KERNENERGIE *RADIOAKTIVITÄT UND STRAHLENSCHUTZ*

Die wichtigsten Erkenntnisse des Strahlenschutzes

Martin Volkmer

Radioaktivität und Strahlenschutz

von Martin Volkmer

Herausgeber:
Informationskreis Kernenergie
Heussallee 10, 53113 Bonn, Tel. 0228/507-226

Redaktionsschluß: Oktober 1994
2. aktualisierte Auflage 121.-170. Tsd./1994

ISBN 3-925986-06-5

Berater:
Dipl.-Phys. Winfried Koelzer, KfK
Heike Elvers, Inst. f. Lehrerfortbildung
Dr. rer. nat. Jörg Ernst, HEW
Dipl.-Phys. Thomas Linke, HEW
Dipl.-Phys. Dieter Sönksen, HEW
Hermann Stolberg, KKKrümmel GmbH

Redaktion:
Norbert Krause, HEW
Dipl.-Ing. Holger Todt, HEW

Anmerkungen zu den verwendeten kernphysikalischen Größen und ihren Einheiten

(a) Die **Aktivität** A gibt die Anzahl n der Kernumwandlungen pro Zeit t an.

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Die Einheit der Aktivität ist die reziproke Sekunde (s^{-1}).
Als besonderer Einheitenname dient das Becquerel (Bq).

$$1 \cdot s^{-1} = 1\,\text{Bq}$$

Der Betrag in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen in 1 Sekunde an. Für Umrechnungen gilt: 1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq

Die Aktivität A pro Masse m oder Volumen V wird als spezifische Aktivität A_{sp} bezeichnet. Sie gibt die Anzahl der Kernumwandlungen an, die in 1 Sekunde in 1 g (1 kg, 1 t) bzw. in 1 cm^3 (1 l, 1 m^3) stattfinden.

$$A_{sp} = \frac{A}{\Delta m}$$

(Nach DIN 6814/Teil 4 ist als Formelzeichen für die spezifische Aktivität der Buchstabe a festgelegt worden. Er wird hier aus pädagogischen Gründen nicht verwendet.)

(b) Die **Energiedosis** D einer ionisierenden Strahlung gibt die pro Masse m eines durchstrahlten Stoffes absorbierte Energie W an.

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}$$

Als Einheit der Energiedosis dient der Quotient 1 J/1 kg. Als besonderer Einheitenname wurde das Gray (Gy) eingesetzt.

$$1\,\text{Gy} = \frac{1\,\text{J}}{1\,\text{kg}}$$

(c) Verschiedene Strahlenarten führen bei gleichen Energiedosen zu unterschiedlichen biologischen Wirkungen. Zur Beschreibung der biologischen Strahlenwirkungen ist also die Energiedosis nicht ausreichend. Man hat deshalb die **Äquivalentdosis** definiert. Unter der Annahme gleicher Versuchsbedingungen ergibt sich die Äquivalentdosis H aus der Energiedosis D, multipliziert mit einem Qualitätsfaktor $\overline{Q}$.

$$H = D \cdot \overline{Q}$$

Die Qualitätsfaktoren sind aus Experimenten gewonnene Erfahrungswerte ($\overline{Q}$ = 1 für Röntgen-, Gamma- und Betastrahlung, $\overline{Q}$ = 10 für Neutronenstrahlung und $\overline{Q}$ = 20 für Alphastrahlung).

Da der Qualitätsfaktor ein Zahlenwert ohne Einheit ist, ergibt sich als Einheit der Äquivalentdosis der Quotient 1 J/1 kg (dieselbe Einheit wie für die Energiedosis).
Um deutlich zu machen, daß eine Dosis eine Äquivalentdosis ist, wird im Strahlenschutz für 1 J/1 kg der Einheitenname Sievert (Sv) benutzt.

Für Umrechnungen gilt: 1 Sv = 100 rem

Inhalt

Allgemeine Hinweise:

- Die Äquivalentdosiswerte sind durchgängig in Sievert angegeben. Um andererseits die Verbindung zur älteren Literatur leichter zu ermöglichen, finden sich in Klammern oder einer gesonderten Spalte auch die entsprechenden Angaben in Rem.
- Bei der Übernahme der Aktivitäts- und Äquivalentdosiswerte aus älteren Literaturquellen wurden bei der Umrechnung von Curie in Becquerel und von Rem in Sievert die Werte nicht gerundet, um eine Überprüfung anhand der Quellen leichter zu ermöglichen .
- Das Wort Bundesrepublik Deutschland wird im Sinne des bis zum 3. 10. 1990 bestandenen Staates (westliche zehn Bundesländer) verwendet.

1 Chemische Elemente und ihre kleinsten Teilchen

1.1 Chemische Elemente

Der Planet Erde besteht aus rund 90 chemischen Elementen. Boden und Gesteine, Wasser, Luft, Pflanzen, Tiere und Menschen setzen sich daraus zusammen. In der Erdrinde einschließlich Wasser und Luft sind folgende Elemente am häufigsten (Tabelle 1.1.1, Abb. 1.1.1):

Sauerstoff	49,2	Kalium	2,4	Kohlenstoff	0,08
Silicium	25,7	Magnesium	1,93	Mangan	0,08
Aluminium	7,5	Wasserstoff	0,87	Schwefel	0,06
Eisen	4,71	Titan	0,58	Barium	0,04
Calcium	3,39	Chlor	0,19	Stickstoff	0,03
Natrium	2,63	Phosphor	0,11	Fluor	0,03

Tabelle 1.1.1
Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste einschließlich Luft und Wasser (Angaben in Gewichtsprozent) [11, S. 38]

Auf die restlichen weniger als 0,2% entfallen alle übrigen Elemente, z.B. Kupfer, Blei, Zinn, Uran, Iod, Cäsium, Strontium, Helium, Neon usw.
Man nimmt an, daß sich unter der Erdkruste eine Schicht befindet, die vorwiegend aus Metallsulfiden besteht. Der Kern der Erde setzt sich wahrscheinlich im wesentlichen aus Eisen und Nickel zusammen.
Die chemische Zusammensetzung des Menschen ist von seinen Erbanlagen, den Verzehr- und Lebensgewohnheiten, den örtlichen Gegebenheiten sowie seinem Alter abhängig. Für wissenschaftliche Berechnungen benötigt man aber eine einheitliche biologische Grundlage. Es ist deshalb der Standardmensch definiert worden. Bei ihm legt man ein Alter von 20 bis 30 Jahren, eine Gesamtlebensdauer von 70 Jahren = 25500 Tagen, ein Körpergewicht von 70 kg, eine Körperoberfläche von 1,8 m^2 sowie eine Körpergröße von 170 cm zugrunde.
In Tabelle 1.1.2 sowie in Abb. 1.1.2 finden sich einige Daten des Standardmenschen.

Element	Masse in g	% des Körpergewichts
Sauerstoff	45500	65
Kohlenstoff	12600	18
Wasserstoff	7000	10
Stickstoff	2100	3
Calcium	1050	1,5
Phosphor	700	1
Schwefel	175	0,25
Kalium	140	0,2
Natrium	105	0,15
Chlor	105	0,15
Magnesium	35	0,05
Eisen	4	0,0057
Kupfer	0,1	$1{,}4 \cdot 10^{-4}$
Iod	0,03	$4{,}3 \cdot 10^{-5}$
Mangan	0,02	$3{,}0 \cdot 10^{-6}$
und weitere Spurenelemente		

Tabelle 1.1.2
Zusammensetzung des menschlichen Körpers [55, S. 62]

Abb. 1.1.1
Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste (einschließlich Luft und Wasser)

Abb. 1.1.2
Zusammensetzung des menschlichen Körpers (Standardmensch)

Element	Symbol	Ordnungs-zahl	Element	Symbol	Ordnungs-zahl	Element	Symbol	Ordnungs-zahl
Wasserstoff	H	1	Strontium	Sr	38	Rhenium	Re	75
Helium	He	2	Yttrium	Y	39	Osmium	Os	76
Lithium	Li	3	Zirkonium	Zr	40	Iridium	Ir	77
Beryllium	Be	4	Niob	Nb	41	Platin	Pt	78
Bor	B	5	Molybdän	Mo	42	Gold	Au	79
Kohlenstoff	C	6	Technetium	Tc	43 *	Quecksilber	Hg	80
Stickstoff	N	7	Ruthenium	Ru	44	Thallium	Tl	81
Sauerstoff	O	8	Rhodium	Rh	45	Blei	Pb	82
Fluor	F	9	Palladium	Pd	46	Wismut	Bi	83
Neon	Ne	10	Silber	Ag	47	Polonium	Po	84
Natrium	Na	11	Cadmium	Cd	48	Astat	At	85
Magnesium	Mg	12	Indium	In	49	Radon	Rn	86
Aluminium	Al	13	Zinn	Sn	50	Francium	Fr	87
Silicium	Si	14	Antimon	Sb	51	Radium	Ra	88
Phosphor	P	15	Tellur	Te	52	Actinium	Ac	89
Schwefel	S	16	Iod	I	53	Thorium	Th	90
Chlor	Cl	17	Xenon	Xe	54	Protactinium	Pa	91
Argon	Ar	18	Cäsium	Cs	55	Uran	U	92
Kalium	K	19	Barium	Ba	56	Neptunium	Np	93 *
Calcium	Ca	20	Lanthan	La	57	Plutonium	Pu	94
Scandium	Sc	21	Cer	Ce	58	Americium	Am	95 *
Titan	Ti	22	Praseodym	Pr	59	Curium	Cm	96 *
Vanadium	V	23	Neodym	Nd	60	Berkelium	Bk	97 *
Chrom	Cr	24	Promethium	Pm	61 *	Californium	Cf	98 *
Mangan	Mn	25	Samarium	Sm	62	Einsteinium	Es	99 *
Eisen	Fe	26	Europium	Eu	63	Fermium	Fm	100 *
Kobalt	Co	27	Gadolinium	Gd	64	Mendelevium	Md	101 *
Nickel	Ni	28	Terbium	Tb	65	Nobelium	No	102 *
Kupfer	Cu	29	Dysprosium	Dy	66	Lawrencium	Lw	103 *
Zink	Zn	30	Holmium	Ho	67	Kurtschatowium	Ku	104 *
Gallium	Ga	31	Erbium	Er	68	Hahnium (vorgeschl.)	Ha	105 *
Germanium	Ge	32	Thulium	Tm	69			
Arsen	As	33	Ytterbium	Yb	70	Noch ohne Namen		106 *
Selen	Se	34	Lutetium	Lu	71	Noch ohne Namen		107 *
Brom	Br	35	Hafnium	Hf	72	Noch ohne Namen		108 *
Krypton	Kr	36	Tantal	Ta	73	Noch ohne Namen		109 *
Rubidium	Rb	37	Wolfram	W	74	* Elemente, die ausschließlich künstlich erzeugt worden sind.		

Tabelle 1.1.3
Tabelle der Elemente

1.2 Das Atom

Die kleinsten Teilchen der chemischen Elemente werden Atome genannt. Sie sind so klein, daß Menschen sie nicht sehen können. 10 Millionen Atome aneinandergereiht ergeben erst etwa 1 mm.
Im Modell werden Atome mit einem Kern und einer Hülle dargestellt.
Der Kern besteht aus positiv geladenen Protonen und elektrisch neutralen Neutronen. Sie werden durch sehr starke Kernkräfte zusammengehalten. Die Kernkräfte stehen in einem gewissen Abstand im Gleichgewicht mit den abstoßenden Kräften zwischen den positiv geladenen Protonen.
In der Atomhülle bewegen sich in der Regel ebensoviel negativ geladene Elektronen wie sich Protonen im Kern befinden. Das Atom ist dann nach außen elektrisch neutral (Abb. 1.2.1).

Verliert ein Atom ein Elektron aus seiner Hülle, überwiegen die positiven Ladungen im Kern (pos. Ion). Nimmt ein Atom ein weiteres Elektron in die Hülle auf, überwiegen die negativen Ladungen in der Hülle (neg. Ion) (Abb. 1.2.2).

$7 e^-$ / $8 p^+$ / $8 n$ — Kern — Hülle — Ladungsverhältnis bei einem positiven Sauerstoffion

$9 e^-$ / $8 p^+$ / $8 n$ — Kern — Hülle — Ladungsverhältnis bei einem negativen Sauerstoffion

Abb. 1.2.2
Ladungsverhältnisse bei Ionen

Berechnungen haben ergeben, daß die Hülle des Wasserstoffatoms einen Durchmesser von etwa 0,000 000 1 mm (zehnmillionstel Millimeter) hat.

Elementarteilchen	Masse (Ruhmasse) in kg	Masse (Ruhmasse) in Elektronenmassen	Ladung in C	Ladung in Elementarladungen
Elektron	$9{,}1091 \cdot 10^{-31}$	1	$1{,}6021 \cdot 10^{-19}$	–1
Proton	$1{,}67252 \cdot 10^{-27}$	1836,10	$1{,}6021 \cdot 10^{-19}$	+1
Neutron	$1{,}67482 \cdot 10^{-27}$	1838,62	0	0

Tabelle 1.2.1
Masse und elektrische Ladung der drei wichtigsten Elementarteilchen [75, S. 44]

Vereinfachtes Modell eines Wasserstoffatoms

Vereinfachtes Modell eines Heliumatoms

Vereinfachtes Modell eines Kohlenstoffatoms

Das Atom besteht aus dem positiven Kern und der negativen Hülle

Bestandteile des Atomkerns:
- Proton (+)
- Neutron (n)
  Ausnahme: H–1

Bestandteile der Atomhülle:
- Elektron (–)

Abb. 1.2.1
Atome in vereinfachter Modelldarstellung

1 : 100 000

Größenverhältnis:
Fernsehturm-Streichholzkopf

Abb. 1.2.3
Größenverhältnisse im Wasserstoff-Atom

Der Kern (Proton) dagegen hat einen Durchmesser von etwa 0,000 000 000 001 Millimeter. Er ist fast 100 000 mal kleiner als der Durchmesser der Hülle (Abb. 1.2.3).

Um ein Elektron aus der Hülle abzutrennen, benötigt man Energie. Dabei zeigt sich, daß für die einzelnen Elektronen einer Atomhülle unterschiedlich viel Energie zum Abtrennen aufgewendet werden muß.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnis hat man ein Atommodell entwickelt, bei dem sich die Hülle aus einzelnen Schalen bzw. Bahnen aufbaut (K–, L–, M–, N–, O–, P– und Q–Schale, am Kern beginnend). Je weiter ein Elektron vom Kern entfernt ist, desto weniger fest wird es von ihm gehalten und desto leichter ist es abzutrennen.
Die am weitesten außen befindlichen Elektronen sind an der chemischen Bindung beteiligt. Sie ermöglicht den Aufbau von Molekülen aus einzelnen Atomen.

In der Chemie rechnet man häufig mit Stoffmengen. Als Einheit benutzt man das Mol (mol). Die Anzahl der kleinsten Teilchen (Moleküle, Atome, Ionen) in 1 mol eines Stoffes wird durch die Loschmidtsche Zahl (Konstante) angegeben. Danach enthält 1 mol eines Stoffes $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Teilchen. Das entspricht einer Masse in g, die sich aus der jeweiligen Atom- bzw. Molekularmasse errechnet.

Beispiel 1:
Wieviel Atome enthält 1 g Eisen?
Rel. Atommasse (dem Periodensystem entnommen) : 56

56 g Eisen enthalten $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Eisenatome.

1 g Eisen enthält $n = \frac{6{,}023 \cdot 10^{23}}{56} = \frac{60{,}23 \cdot 10^{22}}{56}$

$n \approx 10^{22}$ Atome

In Gedanken soll dieses 1 g Eisen über die Fläche der Stadt Hamburg verteilt werden (Abb. 1.2.4).

Fläche $A = 747{,}68\ \text{km}^2 \approx 750\,000\,000\ \text{m}^2 = 7{,}5 \cdot 10^8\ \text{m}^2$

Auf 1 m^2 befänden sich dann

$$n = \frac{10^{22}}{7{,}5 \cdot 10^8} = \frac{10 \cdot 10^{21}}{7{,}5 \cdot 10^8}$$

$$\approx 1{,}3 \cdot 10^{13} \text{ Eisenatome}$$

Könnte man dieses 1 g Eisen gleichmäßig im gesamten Wasser der Weltmeere (1370 Mio. $km^3 = 1{,}37 \cdot 10^{18}\ m^3 = 1{,}37 \cdot 10^{21}$ l) verteilen, würden sich noch in jedem Liter Meerwasser etwa 7 Atome befinden (Abb. 1.2.5).

$$n = \frac{10^{22}}{1{,}37 \cdot 10^{21}\ \text{l}} = \frac{10 \cdot 10^{21}}{1{,}37 \cdot 10^{21}\ \text{l}}$$

$$\approx 7 \text{ Atome / l}$$

Beispiel 2:
Wieviel Wassermoleküle befinden sich in 1 g Wasser?
Rel. Molekularmasse (gerundet):

Wasserstoff	: 2
Sauerstoff	: 16
Wasser	: 18

18 g Wasser enthalten $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Wassermoleküle.

1 g Wasser enthält

$$n = \frac{6{,}023 \cdot 10^{23}}{18} = \frac{60{,}23 \cdot 10^{22}}{18}$$

$$n \approx 3{,}4 \cdot 10^{22} \text{ Wassermoleküle.}$$

Abb. 1.2.4
1 g Eisen wird in Gedanken auf die Fläche der Stadt Hamburg verteilt

Abb. 1.2.5
1 g Eisen wird in Gedanken im Wasser der Weltmeere verteilt

1.3 Aufbau der Atomkerne

Proton und Neutron haben fast die gleiche Masse. Die Masse des Elektrons beträgt aber nur 1/1836 der Masse des Protons. Das ist ein so geringer Betrag, daß man ihn bei der Betrachtung der Atommassen vernachlässigen kann. Praktisch ist die gesamte Masse eines Atoms in seinem Kern vereinigt.

Aufbau der Atomkerne im Modell

Kern eines Heliumatoms

2 (+), 2 (n) } 4

$^{4}_{2}He$

Kern eines Kohlenstoffatoms

6 (+), 6 (n) } 12

$^{12}_{6}C$

Kern eines Uranatoms

92 (+), 143 (n) } 235

$^{235}_{92}U$

Massenzahl:

Gesamtzahl der Protonen und Neutronen

Kernladungszahl:

Anzahl der Protonen

Abb. 1.3.1
Atomkerne im Modell

Eine wichtige Eigenschaft des Atomkerns ist seine Ladung. Die Anzahl der positiven Elementarladungen im Kern (Protonenzahl) ist auch gleich der Anzahl der Hüllelektronen eines neutralen Atoms. Die Masse eines Atomkerns setzt sich aus der Masse der Protonen und der ein wenig größeren Masse der Neutronen zusammen (Abb. 1.3.1).

Zur Kennzeichnung des Kernaufbaus wird die Massenzahl (Anzahl der Protonen und Neutronen) oben links, die Kernladungszahl (Anzahl der Protonen) unten links neben das chemische Symbol gesetzt (Tabelle 1.3.1).

Beispiele:

$^{4}_{2}He$	$^{12}_{6}C$	$^{235}_{92}U$
Kern eines Heliumatoms	Kern eines Kohlenstoffatoms	Kern eines Uranatoms
Massenzahl: 4 Kernladungszahl: 2	Massenzahl: 12 Kernladungszahl: 6	Massenzahl: 235 Kernladungszahl: 92

Tabelle 1.3.1
Kennzeichnung des Kernaufbaus

Für die Elementarteilchen gilt:

$^{1}_{1}p$	$^{0}_{-1}e$	$^{1}_{0}n$
Proton	Elektron	Neutron

Eine Atomart, die durch Protonenzahl und Neutronenzahl charakterisiert ist, wird als Nuklid bezeichnet.

Die Atome eines Elements können bei gleicher Protonenzahl eine unterschiedliche Neutronenzahl besitzen. Solche Atome mit gleicher Kernladungszahl (Ordnungszahl), aber mit unterschiedlicher Massenzahl, bezeichnet man als Isotope. Sie unterscheiden sich nicht in ihren chemischen, wohl aber in ihren kernphysikalischen Eigenschaften.

Im natürlichen Wasserstoff treten drei Isotope auf (Abb. 1.3.2):

99,986 % $^{1}_{1}H$ — Der Kern besteht aus einem Proton ($^{1}_{1}p$).

0,014 % $^{2}_{1}H = D$ — Schwerer Wasserstoff oder Deuterium. Der Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron; er wird auch Deuteron genannt (d).

Kleinste Mengen $^{3}_{1}H = T$ — Überschwerer Wasserstoff oder Tritium. Der Kern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen und heißt Triton (t).

Ein Wassermolekül, das z.B. die Wasserstoffisotope H–1 und H–3 (T) enthält, wird deshalb HTO abgekürzt.

Proton $^{1}_{1}H$ Deuteron $^{2}_{1}H$ Triton $^{3}_{1}H$

Abb. 1.3.2
Die Kerne der Wasserstoffisotope

Da die Kernladungszahl für jedes Element festliegt, die Massenzahl aber verschieden sein kann, wird bei einer abgekürzten Schreibweise lediglich die Massenzahl rechts neben den Namen oder das Symbol des betreffenden Elements geschrieben, z.B.:

H–3, He–4, C–12, U–235, U–238.

Anzahl der Protonen		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
10							Ne-16	Ne-17 β^+	Ne-18 β^+	Ne-19 β^+	Ne-20 90,51%	Ne-21 0,27 %	Ne-22 9,22 %	Ne-23 β^-	Ne-24 β^-	Ne-25 β^-	Ne-26 β^-	Ne-27 β^-	Ne-28 β^-
9							F-15	F-16	F-17 β^+	F-18 β^+	F-19 100 %	F-20 β^-	F-21 β^-	F-22 β^-	F-23 β^-	F-24 β^-	F-25 β^-	F-26 β^-	
8					O-12	O-13 β^+	O-14 β^+	O-15 β^+	O-16 99,762%	O-17 0,038%	O-18 0,2%	O-19 β^-	O-20 β^-	O-21 β^-	O-22 β^-	O-23 β^-	O-24 β^-		
7						N-12 β^+	N-13 β^+	N-14 99,63%	N-15 0,37%	N-16 β^-	N-17 β^-	N-18 β^-	N-19 β^-	N-20 β^-	N-21 β^-	N-22 β^-			
6			C-8	C-9 β^+	C-10 β^+	C-11 β^+	C-12 98,90%	C-13 1,1%	C-14 β^-	C-15 β^-	C-16 β^-	C-17 β^-	C-18 β^-	C-19 β^-	C-20 β^-				
5			B-7	B-8 β^+	B-9	B-10 20%	B-11 80%	B-12 β^-	B-13 β^-	B-14 β^-	B-15 β^-		B-17 β^-						
4			Be-6	Be-7 ε	Be-8	Be-9 100%	Be-10 β^-	Be-11 β^-	Be-12 β^-		Be-14 β^-								
3			Li-5	Li-6 7,5%	Li-7 92,5%	Li-8 β^-	Li-9 β^-	Li-10	Li-11 β^-										
2		He-3 0,000138 %	He-4 99,999862 %	He-5	He-6 β^-	He-7	He-8 β^-	He-9											
1	H-1 99,985%	H-2 0,015%	H-3 β^-																
0		n-1 β^-																	

Anzahl der Neutronen

Erklärung der Farben:

- Stabiles Nuklid
- Beta$^-$-Zerfall (β^-)
- Beta$^+$-Zerfall (β^+); Elektroneneinfang (ε)
- Alpha-Zerfall *)

*Kommt in diesem Teil der Nuklidkarte nicht vor.

Tabelle 1.3.2 Auszug aus der Karlsruher Nuklidkarte [64] (Die Prozentzahlen geben die Häufigkeit in den natürlichen Isotopen an.)

2 Kernumwandlungen und Radioaktivität

2.1 Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Bestimmte Nuklide (Atomkernarten) haben die Eigenschaft, sich von selbst, ohne äußere Einwirkung, umzuwandeln. Dabei wird Strahlung ausgesandt. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Radioaktivität. Die Kerne radioaktiver Atome heißen Radionuklide.
Von den bisher bekannten etwa 2 500 verschiedenen Nukliden, die Isotope der 109 chemischen Elemente sind, sind nur 249 stabil, alle anderen zerfallen spontan [64]. Bei den in der Natur vorkommenden Radionukliden spricht man von natürlicher Radioaktivität; bei den durch künstliche Kernumwandlung erzeugten Radionukliden von künstlicher Radioaktivität.

Alphastrahlen

Die beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen ausgesandten Heliumkerne (2 Protonen, 2 Neutronen) werden Alphastrahlen genannt (Abb. 2.1.1). Die Geschwindigkeit der austretenden Alphateilchen beträgt etwa 15 000 km / s.

Beispiel:
Der Kern des Radium–226 hat 88 Protonen und 138 Neutronen. Seine Kernladungszahl beträgt demnach 88, seine Massenzahl 226. Der Kern ist nicht stabil, da die Kernkräfte die abstoßenden Kräfte der Protonen untereinander nicht vollständig aufheben können. Der Kern hat deshalb das Bestreben, in einen stabileren Zustand überzugehen.

$^{226}_{88}Ra$ $^{222}_{86}Rn$ $^{4}_{2}He$

Abb. 2.1.1
Modell zur Entstehung von Alphastrahlen

Das geschieht in mehreren Stufen, von denen hier nur eine dargestellt ist. Der Kern schleudert einen Heliumkern heraus, wodurch die Kernladungszahl um 2, die Massezahl um 4 sinkt. Es entsteht das neue Element Radon (Rn). Dieser Vorgang kann durch eine Kernreaktionsgleichung beschrieben werden.

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

Massenzahlen: 226 = 222 + 4
Kernladungszahlen: 88 = 86 + 2

In der Gleichung wird links vom Reaktionspfeil der Kernaufbau des Ausgangsatoms, rechts davon das Ergebnis des Zerfalls geschrieben. Dabei müssen auf beiden Seiten die Summe der Kernladungszahlen (86 + 2 = 88) und die Summe der Massenzahl (222 + 4 = 226) übereinstimmen. Das beim Zerfall entstandene Radon–222 ist ebenfalls radioaktiv und zerfällt weiter.

Das entstandene Radon gibt zwei Hüllelektronen an die Umgebung ab. Die ausgesandten Alphateilchen nehmen aus der Umgebung zwei Elektronen auf, wodurch Heliumatome entstehen.

Bei alphastrahlenden Substanzen, die sich in geschlossenen Behältern befinden, kann deshalb nach einiger Zeit Heliumgas nachgewiesen werden. – 1 g Radium und seine Folgeprodukte erzeugen in einem Jahr insgesamt 0,156 cm^3 Heliumgas (Angaben auf 0 °C und Atmosphärendruck bezogen). Das entspricht etwa $4{,}29 \cdot 10^{18}$ Heliumatomen [75, S. 238].

Betastrahlen

Beim Betazerfall wird aus dem Kern eines Radionuklids ein Elektron abgegeben. Seine Geschwindigkeit kann zwischen Null und nahezu Lichtgeschwindigkeit liegen. Diese Elektronen bilden dann Betastrahlen (Abb. 2.1.2).

$^{137}_{55}Cs$ $^{137}_{56}Ba$
e^-
Beta⁻-Teilchen (Elektron)
p
e^-
n

Abb. 2.1.2
Modell zur Entstehung der Beta⁻-Strahlen

Das Elektron entsteht, wenn sich im Kern ein Neutron in ein Proton und ein Elektron umwandelt.

Reaktionsgleichung: $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$

Beispiel eines Beta⁻-Zerfalls: $^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}e$

Cäsium–137 wandelt sich unter Aussenden eines Elektrons in Barium–137 um.
Da die Elektronen je eine negative Elementarladung tragen, werden die Strahlen auch als Beta⁻-Strahlen bezeichnet.

Da nach dem Aussenden eines Betateilchens der Kern ein

Proton mehr besitzt, muß auch die Kernladungszahl des neu entstandenen Elements um eins höher liegen. Die Zahl der Kernteilchen hat sich jedoch insgesamt nicht verändert, wodurch die ursprüngliche Massenzahl erhalten bleibt.

Beta$^-$ - Strahlen bilden einen Elektronenstrom, der die gleichen Eigenschaften zeigt wie der elektrische Strom in metallischen Leitern. So erzeugen z.B. beide ein Magnetfeld, das in konzentrischen Kreisen zur Ausbreitungsrichtung liegt.

Bei natürlichen und künstlich hergestellten Radionukliden tritt eine Strahlung auf, bei der Teilchen von der Masse eines Elektrons aber mit einer positiven Ladung ausgeschleudert werden. Es sind Positronen. Die Strahlung wird deshalb Positronenstrahlung genannt (Abb. 2.1.3).

Das Positron entsteht im Kern, wenn sich ein Protron in ein Neuton und ein Positron umwandelt.

Reaktionsgleichung: $^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$

Beispiel für einen Beta$^+$-Zerfall: $^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{+1}e$

Natrium–22 wandelt sich unter Aussenden eines Positrons in Neon–22 um.

Abb. 2.1.3
Modell zur Entstehung der Beta$^+$ -Strahlen

Beim Beta$^+$-Zerfall nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während sich die Massenzahl nicht verändert.

Beim Betazerfall wird außerdem ein weiteres Teilchen ausgesandt, das keine Ruhemasse und keine elektrische Ladung besitzt. Beim Zerfall eines Neutrons entsteht ein Antineutrino, beim Zerfall eines Protons ein Neutrino. Neutrinos und Antineutrinos besitzen ein großes Durchdringungsvermögen und sind deshalb schwer nachzuweisen. (Bei den Kernreaktionsgleichungen werden hier aus Gründen der Vereinfachung Neutrino oder Antineutrino nicht mit angegeben.)

Gammastrahlen

Bei den Kernumwandlungen kann eine energiereiche Wellenstrahlung vorkommen. Sie hat die gleiche Natur wie das sichtbare Licht, sie ist nur energiereicher als dieses (kürzere Wellenlänge) und heißt Gammastrahlung. Abgesehen von der Art des Entstehens ist sie praktisch identisch mit der Röntgenstrahlung. Die Gammastrahlung wird – wie auch das sichtbare Licht – in einzelne „Portionen" (Quanten, Photonen) abgegeben (Abb. 2.1.4).

Abb. 2.1.4
Abgabe eines Gammaquants aus einem Atomkern (Modell)

Die Gammaquanten bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit c_0 = 299 792,5 km / s (Vakuumlichtgeschwindigkeit). Gammastrahlen treten häufig bei einem Alpha- oder Betazerfall auf.

Der Atomkern gibt noch vorhandene überschüssige Energie in Form eines oder mehrerer Gammaquanten ab und geht dabei von einem höheren (angeregten) zu einem niedrigeren Energieniveau über.

Durch den Gammazerfall ändert sich also der Energieinhalt des Kerns, nicht jedoch dessen Kernladungs- und Massenzahl.

Beispiel: $^{137m}_{56}Ba \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + \gamma$

Ein angeregter (metastabiler) Bariumkern gibt ein Gammaquant ab und geht dadurch in einen niedrigeren und gleichzeitig stabilen Energiezustand über.

Gammaquanten stellen eine „Portion" elektromagnetischer Energie dar. Da Energie und Masse einander äquivalent (gleichwertig) sind, läßt sich jedem Energiebetrag eine Masse zuordnen. Das geschieht durch eine Rechnung nach der von Einstein formulierten Gleichung $W = m \cdot c_0^2 \Rightarrow m = W / c_0^2$ (W: Energie; m: Masse; c_0: Vakuumlichtgeschwindigkeit).

Bei Gammaquanten, die von radioaktiven Atomkernen ausgesandt werden, ergeben sich Massen, die etwa Elektronenmassen entsprechen [75, S. 100]. – Die als Teilchen aufgefaßten Gammaquanten besitzen aber keine Ruhmasse und keine elektrische Ladung.

Gammaquanten treten außer bei Kernumwandlungen auch noch bei anderen Reaktionen zwischen Elementarteilchen (Bausteinen des Atoms) auf.

2.2 Protonen- und Neutronenstrahlen

Die erste künstliche Kernumwandlung wurde in einer mit Stickstoff gefüllten Nebelkammer beobachtet. Aus den Untersuchungen ergab sich folgende Erklärung:

Ein Alphateilchen (Heliumkern) dringt in den Kern eines Stickstoffatoms ein und verschmilzt mit ihm für kurze Zeit zu einem hochangeregten Zwischenkern des Elements Fluor. Der Fluorkern zerfällt in einen Sauerstoffkern und ein Proton.

Kernreaktionsgleichung (Abb. 2.2.1):

$$^{4}_{2}He + ^{14}_{7}N \rightarrow ^{18}_{9}F \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}p$$

Als abgekürzte Schreibweise für Kernreaktionen wird folgende Zusammenstellung benutzt:

$$^{14}_{7}N\ (\alpha,\ p)\ ^{17}_{8}O$$

Ausgangskern — Geschoß — ausgesandtes Teilchen — Endkern

Bei dieser Schreibweise wird der Zwischenkern nicht mit angegeben.

Nach der Kernreaktion erfolgt ein Elektronenausgleich, d. h., es werden aus der Umgebung soviele Elektronen aufgenommen (oder in anderen Fällen an sie abgegeben), daß die beteiligten Atome wieder elektrisch neutral sind.

Abb. 2.2.1
Nachweis freier Protonen durch Ernest Rutherford 1919

Werden Neutronen aus einem Atomkern herausgeschlagen oder herausgeschleudert, entsteht dadurch eine Neutronenstrahlung. Das kann z.B. in den oberen Schichten der Atmosphäre durch Zusammenprall der kosmischen Primärteilchen mit den Luftmolekülen geschehen oder bei Kernspaltungen in einem Kernkraftwerk.

Bei der Kernspaltung nimmt der Kern das Uran–235 ein Neutron auf, wodurch er in starke Schwingungen gerät und sich spaltet. Dabei fliegen zwei mittelschwere Trümmerkerne und zwei bis drei Neutronen auseinander. Außerdem werden einige Gammaquanten abgegeben. Bei Kernspaltungen entsteht also Neutronenstrahlung (Abb. 2.2.2).

Ein freies Neutron ist radioaktiv. Es zerfällt in ein Proton und ein Elektron sowie ein Antineutrino (in der Reaktionsgleichung weggelassen).

Reaktionsgleichung: $^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{0}_{-1}e$

Abb. 2.2.2
Modell zur Spaltung eines Kerns U–235

2.3 Der Elektroneneinfang

Bei natürlichen und künstlich erzeugten Radionukliden kann noch eine weitere Umwandlungsart auftreten, der sogenannte Elektroneneinfang.

Der Kern eines neutronenarmen Atoms fängt meist aus der innersten Schale der Elektronenhülle (der K-Schale, daher auch der Name K-Einfang) ein Elektron ein, wodurch sich ein Proton in ein Neutron umwandelt (Abb. 2.3.1). (Der in der Atomhülle freigewordene Platz wird von einem äußeren Elektron wieder aufgefüllt. Dabei entsteht eine charakteristische Röntgenstrahlung.)

Reaktionsgleichung: $^{0}_{-1}e + ^{1}_{1}p \rightarrow ^{1}_{0}n$

Beispiel: $^{40}_{19}K + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{40}_{18}Ar$

Das in der Natur vorkommende Isotop Kalium−40 wandelt sich zum Teil unter Elektroneneinfang in das Isotop Argon−40 um. Auch beim Elektroneneinfang nimmt die Kernladungszahl um eine Einheit ab, während die Massenzahl unverändert bleibt. Der Elektroneneinfang führt also zu dem gleichen Ergebnis wie die Abgabe eines Positrons.

Abb. 2.3.1
K-Einfang im Modell

2.4 Die Halbwertszeit

Bei einem einzelnen radioaktiven Atomkern kann man nicht vorhersagen, zu welchem Zeitpunkt er zerfallen wird. Er kann in der nächsten Sekunde oder aber erst in Tausenden von Jahren zerfallen.

Bei einer großen Anzahl von Atomen läßt sich aber eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den Ablauf des Zerfalls machen.

Es zerfällt zum Beispiel von einer Menge Wasserstoff−3 (Tritium) in ca. 12,3 Jahren die Hälfte der Atome, nach weiteren 12,3 Jahren ist von dem Rest wiederum die Hälfte zerfallen usw.

Die Zeit, nach der die Hälfte einer bestimmten Anzahl von Atomkernen zerfallen ist, wird Halbwertszeit (HWZ) genannt. Sie ist für jedes Radionuklid eine charakteristische Größe (Abb. 2.4.1).

Abb. 2.4.1
Abklingen der Radioaktivität bei Wasserstoff−3 (Tritium)

Die Halbwertszeiten liegen zwischen Milliarden Jahren und Sekundenbruchteilen (Tabelle 2.4.1).

Element	Symbol	HWZ	Zerfalls-art
Uran−238	$^{238}_{92}U$	$4{,}468 \cdot 10^{9}$ a	α
Kalium−40	$^{40}_{19}K$	$1{,}28 \cdot 10^{9}$ a	β⁻, K
Plutonium−239	$^{239}_{94}Pu$	$2{,}411 \cdot 10^{4}$ a	α
Cäsium−137	$^{137}_{55}Cs$	30,17 a	β⁻
Iod−131	$^{131}_{53}I$	8,02 d	β⁻
Thorium−231	$^{231}_{90}Th$	25,5 h	β⁻
Radon−220	$^{220}_{86}Rn$	55,6 s	α
Polonium−214	$^{214}_{84}Po$	$1{,}64 \cdot 10^{-4}$ s	α

Tabelle 2.4.1
Halbwertszeiten einiger Radionuklide
(a = Jahr, d = Tag, m = Minute, s = Sekunde)

3 Die Energie von Strahlungsteilchen und Gammaquanten

3.1 Die Energieeinheit Elektronvolt

Zum Messen von Energien werden die Einheiten Newtonmeter (Nm), Joule (J) und Wattsekunde (Ws) verwendet. Dabei gilt:

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

• 1 Nm Energie ist erforderlich, um eine Masse von etwa 100 g einen Meter hochzuheben (Abb. 3.1.1).

• Steigt die Temperatur von 1 g Wasser um etwa 0,24 °C an, ist dem Wasser eine Energie von 1 J zugeführt worden (Abb. 3.1.2).

Abb. 3.1.1
Veranschaulichung von 1 Nm

Abb. 3.1.2
Veranschaulichung von 1 J

• Bei 1 V Spannung und einer Stromstärke von 1 A wird in 1 s die Energie von 1 Ws z.B. in Wärme umgewandelt (Abb. 3.1.3).

Bei Kernumwandlungen treten sehr viel kleinere Energiewerte auf. Deshalb ist zusätzlich die Einheit Elektronvolt (eV) festgelegt worden.

Definition:
1 eV ist die Energie, die ein Elektron aufnimmt, wenn es beim freien Durchlaufen einer Spannung von 1 V beschleunigt wird (Abb. 3.1.4).

Abb. 3.1.3
Veranschaulichung von 1 Ws

Abb. 3.1.4
Veranschaulichung der Energieeinheit Elektronvolt

Je höher also die Spannung ist, desto größer wird die Bewegungsenergie der Teilchen. ODER: Je größer die Angabe in eV ist, desto schneller bewegen sie sich.

Vielfache von 1 eV:

1 Kiloelektronvolt (keV) $= 10^3$ eV
1 Megaelektronvolt (MeV) $= 10^6$ eV
1 Gigaelektronvolt (GeV) $= 10^9$ eV

Für Umrechnungen gilt:

$1 \text{ eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
$1 \text{ J} = 6{,}242 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

Beispiele:
Die Bewegungsenergie von Gasatomen und Gasmolekülen ist von der Temperatur des Gases abhängig. Bei Zimmertemperatur beträgt sie etwa 0,04 eV (Bewegungsenergie). Energiebeiträge dieser Größenordnung ($x \cdot 0{,}01$ eV) werden als thermische Energie bezeichnet. Thermische Neutronen, die bei der Spaltung der Kerne von Uran–235 eine Rolle spielen, haben eine Energie von etwa 0,025 eV. Das entspricht einer mittleren Geschwindigkeit des einzelnen Neutrons von etwa 2000 m / s = 7200 km / h.
Freie Elektronen in einem Metalldraht führen Schwirrbewegungen aus. Ihre mittlere Geschwindigkeit liegt $\overline{v} \approx 10^5$ m / s.

3.2 Energie der Teilchenstrahlen

Der Zerfall eines radioaktiven Atomkerns kann durch eine Kernreaktionsgleichung oder mit einem Umwandlungsschema beschrieben werden. Beim Umwandlungsschema geben die waagerechten Linien die Energieniveaus an. Senkrechte Linien bedeuten Energieänderungen, Verschiebungen nach links eine Verringerung an positiver Kernladung, Verschiebungen nach rechts eine Zunahme an positiver Kernladung. Der Buchstabe m ist die Abkürzung für das Wort metastabil (bedingt stabil, unvollkommen stabil).

Energie von Alphateilchen

Die von einem radioaktiven Atomkern ausgesandten Alphateilchen besitzen alle dieselbe Energie oder beim Zerfall in mehreren Gruppen unterschiedliche Energien. Die Alphateilchen einer Gruppe haben aber immer dieselbe Energie.

Beispiel für einen Gruppenzerfall (Abb. 3.2.1):

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow \underset{(4{,}60\text{ MeV})}{^{4}_{2}\text{He}} + ^{222}_{86}\text{Rn} + \underset{(0{,}186\text{ MeV})}{\gamma}$$

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow \underset{(4{,}78\text{ MeV})}{^{4}_{2}\text{He}} + ^{222}_{86}\text{Rn}$$

Abb. 3.2.1
Umwandlungsschema für Ra–226

Hat das ausgesandte Alphateilchen die Maximalenergie erhalten, ist der Kern in den Grundzustand übergegangen. Ist die Energie des Alphateilchens kleiner, befindet sich der Kern noch in einem angeregten Zustand (metastabil). Die restliche Energie des angeregten Kerns wird in Form eines Gammaquants abgegeben.

Beispiele für die Energie von Alphateilchen einiger Radionuklide:

Radionuklid	Energie der Alphateilchen in MeV
$^{210}_{84}\text{Po}$	5,30438 ....
$^{222}_{86}\text{Rn}$	5,48952 ....
$^{226}_{88}\text{Ra}$	4,78438; 4,6017 ....
$^{238}_{92}\text{U}$	4,197 ....
$^{239}_{94}\text{Pu}$	5,157; 5,144 ....

Tabelle 3.2.1
(Die Punkte hinter den Energiewerten weisen auf weitere Alphateilchen hin, die mit geringerer Häufigkeit auftreten.)

Energie von Betateilchen

Die beim Betazerfall auftretenden Elektronen oder Positronen besitzen alle unterschiedliche Energien. Sie können zwischen Null und einem Maximalwert liegen, wobei die größte Häufigkeit für jedes Radionuklid bei einem bestimmten Energiewert liegt (Abb. 3.2.2). Die mittlere Energie $\overline{W}$ der Betateilchen ergibt sich aus $\overline{W} \approx \frac{1}{3} \cdot \overline{W}_{max}$.

Abb. 3.2.2
Energieverteilung beim Beta⁻-Zerfall des P–32

Die kontinuierliche Energieverteilung rührt daher, daß beim Betazerfall außer dem Elektron ein Antineutrino bzw. außer dem Positron ein Neutrino entsteht.

Beta⁻-Zerfall: $^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{1}_{1}\text{p} + ^{0}_{-1}\text{e} + ^{0}_{0}\overline{\nu}_e$

Beta⁺-Zerfall: $^{1}_{1}\text{p} \rightarrow ^{1}_{0}\text{n} + ^{0}_{+1}\text{e} + ^{0}_{0}\nu_e$

(ν: griechischer Buchstabe „nü“)

Die frei werdende Zerfallsenergie verteilt sich dann nach Zufall in beliebigen Bruchteilen der Maximalenergie auf die beiden Elementarteilchen.

In Kernreaktionsgleichungen, Umwandlungsschemata und Tabellen wird nur die Maximalenergie angegeben.

Beispiel:

$$^{32}_{15}P \rightarrow \underset{(1,7\ MeV)}{^{0}_{-1}e} + ^{32}_{16}S$$

Neutrinos und Antineutrinos besitzen keine Ruhmasse und keine Ladung. Sie stellen also eine Portion besonderer Energie dar. Da sie ein außerordentlich hohes Durchdringungsvermögen haben, lassen sie sich nur schwer nachweisen.

Abb. 3.2.3
Umwandlungsschema für H−3

Wird durch Elektron und Antineutrino bzw. Positron und Neutrino nicht die gesamte Zerfallsenergie verbraucht, entstehen zusätzlich noch ein Gammaquant oder mehrere Gammaquanten (Abb. 3.2.4).

Abb. 3.2.4
Umwandlungsschema für Co−60

Beispiele für die maximale Energie von Beta$^-$ - Teilchen einiger Radionuklide:

Radionuklid	Maximalenergie von Beta$^-$-Teilchen in MeV
$^{60}_{27}Co$	0,3; 1,5
$^{85}_{36}Kr$	0,7 ....
$^{90}_{38}Sr$	0,5
$^{131}_{53}I$	0,6; 0,8 ....
$^{210}_{82}Pb$	0,02; 0,06
$^{214}_{83}Bi$	1,5; 3,3 ....

Tabelle 3.2.2
Maximale Betaenergie einiger Radionuklide

Energie von Neutronen

Abhängig von der Entstehungsart haben die bei Kernprozessen erzeugten Neutronen eine einheitliche Energie oder ihre Energie liegt zwischen Null und einem Höchstwert (kontinuierliche Energieverteilung).
Bei der Freisetzung von Neutronen mit Hilfe von Gammaquanten (Kernphotoeffekt) entstehen Neutronen, die alle eine einheitliche Geschwindigkeit und damit auch gleich viel Bewegungsenergie besitzen.

Beispiel (Abb. 3.2.5):

$$^{2}_{1}H + \gamma \rightarrow \underset{(0,2\ MeV)}{^{1}_{0}n} + ^{1}_{1}H$$

Abb. 3.2.5
Strahlungseinfang bei schwerem Wasserstoff

Neutronen, die durch eine sog. (α, n)-Reaktion erzeugt werden, besitzen unterschiedliche Geschwindigkeiten, d. h. unterschiedlich viel Bewegungsenergie.

Beispiel für eine Pu-Be-Quelle (Pu liefert die Alphateilchen):

$$^{4}_{2}He + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{13}_{6}C \rightarrow \underset{\text{(ca. 10 MeV)}}{^{1}_{0}n} + ^{12}_{6}C$$

$$^{9}_{4}Be(\alpha,n)\,^{12}_{6}C$$

Die stärksten kommerziellen Neutronenquellen stellen heute die Kernreaktoren dar. In ihnen verwendet man in der Regel U–235 als spaltbares Material. Bei der Spaltung eines jeden Kerns entstehen zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie zwei bis drei Neutronen. Diese Spaltneutronen haben unterschiedliche Geschwindigkeiten (Energien), wobei der Wert von etwa 0,7 MeV am häufigsten auftritt (Abb. 3.2.6).

Abb. 3.2.6
Energieverteilung der Neutronen, die bei Spaltung von U–235 durch thermische Neutronen entstehen

Zur Charakterisierung der Neutronen nach ihrer Geschwindigkeit (Energie) wird die Einteilung nach Tabelle 3.2.3 verwendet. Die angegebenen Energiebeträge stellen Richtwerte dar, die Übergänge sind fließend.

Bezeichnung	Energie
langsame (thermische) Neutronen	< 10 eV
mittelschnelle (epithermische oder intermediäre) Neutronen	10 eV – 0,1 MeV
schnelle Neutronen	> 0,1 MeV

Tabelle 3.2.3
Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie [39, S. 100 u. 101]

3.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung

Bei der Spaltung eines Kerns U–235 werden ca. 210 MeV Energie frei. Sie setzen sich aus folgenden Teilbeträgen zusammen (Tabelle 3.3.1):

Bewegungsenergie der Trümmerkerne	175 MeV
Bewegungsenergie der prompten Neutronen	5 MeV
Bei der Kernspaltung auftretende prompte Gammastrahlung	7 MeV
Energie der Betateilchen (Betazerfall der Trümmerkerne)	7 MeV
Energie der Gammaquanten (Gammazerfall der Trümmerkerne)	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
Summe	210 MeV

Tabelle 3.3.1
Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Abb. 3.3.1
Trümmerkerne und Neutronen, die bei der Kernspaltung entstehen, besitzen Bewegungsenergie

Werden die Teilchen an der umgebenden Materie abgebremst, entsteht Wärme.
Von dem Energiebetrag ΔW = 210 MeV können in einem Kernreaktor nur etwa 190 MeV = $1{,}9 \cdot 10^8$ eV genutzt werden, das sind rund 90%. (Die Energie der prompten Gammastrahlen wird nur z. T. im Innern des Reaktors absorbiert. Die Zerfallsenergie der Trümmerkerne wird z. T. erst im radioaktiven Abfall außerhalb des Reaktors frei. Die Energie der Neutrinos kann praktisch gar nicht genutzt werden, da sie mit Materie kaum in Wechselwirkung treten.)
Die pro Kernspaltung nutzbare Energie von $1{,}9 \cdot 10^8$ eV ist ein sehr kleiner Betrag. Um 1 J Wärme zu erzeugen, müssen $n > 30$ Mrd. Urankerne gespalten werden.

$$1\ \text{J} = 6{,}242 \cdot 10^{18}\ \text{eV}$$

$$n = \frac{6{,}242 \cdot 10^{18}\ \text{eV}}{1{,}9 \cdot 10^{8}\ \text{eV}} \approx 3{,}3 \cdot 10^{10} = 33\ \text{Mrd.}$$

3.4 Energie und Wellenlänge der Gammastrahlen

Alphateilchen, Betateilchen, Protonen und Neutronen, die bei Kernumwandlungen ausgeschleudert werden, ergeben eine Teilchenstrahlung. Ausgeschleuderte Gammaquanten bilden eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Sie hat dieselbe Natur wie z.B. die Rundfunkwellen, das sichtbare Licht oder die Röntgenstrahlen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen beträgt im Vakuum $c_0 = 299\,792{,}458$ km / s ≈ 300 000 km / s. Sie ist unabhängig von der Energie der einzelnen Gammaquanten (Photonen). Die Energie eines einzelnen Quants ist nur von seiner Wellenlänge bzw. seiner Frequenz abhängig. Je kleiner die Wellenlänge (bzw. je größer die Frequenz) eines Quants, desto größer ist auch seine Energie (Abb. 3.4.1).

Abb. 3.4.1
Wellenlänge bzw. Frequenz eines Quants bestimmen seine Energie

Die Tabelle 3.5.1 zeigt, daß die Energie der Gammaquanten bis zu 10^7 mal so groß sein kann wie die Energie der Lichtquanten.

Gammaquanten werden u. a. nach einem Alpha- oder Betazerfall aus einem Kern emittiert, wenn dieser noch überschüssige Energie besitzt. Das kann in einer oder in mehreren Stufen geschehen. Die Quanten jeder einzelnen Stufe haben alle dieselbe Energie.

Die Anzahl der ausgesandten Quanten kann also größer sein als die Anzahl der umgewandelten Atomkerne.

Beispiele für die Energie von Gammaquanten einiger Radionuklide:

Radionuklid	Umwandlungsart	Energie der häufigsten Gammaquanten in der Reihenfolge ihrer Häufigkeit (in MeV)
$^{7}_{4}Be$	K	0,478
$^{16}_{7}N$	β^-	6,129 ; 7,115 ....
$^{22}_{11}Na$	β^+	1,275
$^{137m}_{56}Ba$	γ	0,662
$^{235}_{92}U$	α	0,186 ....

Tabelle 3.4.1
Gammaquanten einiger Radionuklide

3.5 Energie und Wellenlänge bei Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen werden mit Hilfe von Röntgenröhren erzeugt (Abb. 3.5.1). In einer luftleeren Glasröhre stehen sich Katode und Anode gegenüber. Aus der glühenden Katode treten Elektronen aus (Glühemission), die durch eine hohe Spannung (bis 150 kV) zwischen Katode und Anode beschleunigt werden. Treffen sie auf die Wolframanode, entsteht Röntgenstrahlung. Dabei wird nur 1 % der Bewegungsenergie in Röntgenstrahlung, 99 % in Wärme umgewandelt. Die Anode muß deshalb fortlaufend gekühlt werden.

Abb. 3.5.1
Vereinfachte Schnittzeichnung einer Röntgenröhre
(U_H = Heizspannung, K = Katode, A = Anode, R = Röhrenabschirmung, F = Strahlenaustrittsfenster)

In einer Röntgenröhre entsteht überwiegend Röntgenbremsstrahlung. Ihre Entstehung kann man sich im Modell folgendermaßen vorstellen: Ein beschleunigtes Elektron dringt in ein Atom des Anodenmaterials ein und wird dabei ganz oder teilweise abgebremst. Die verlorengegangene Bewegungsenergie wird in Form eines Röntgenquants abgegeben (Abb. 3.5.2).

Abb. 3.5.2
Erzeugung von Bremsstrahlung durch Abbremsung eines Elektrons im elektrischen Feld eines Atoms

Diese Quanten bilden die Röntgenbremsstrahlung mit kontinuierlicher Energieverteilung (Abb. 3.5.3).

Je höher die Beschleunigungsspannung ist, desto mehr Röntgenquanten werden erzeugt und desto energiereichere bzw. härtere Quanten (Quanten mit kürzerer Wellenlänge) entstehen. (Beim Betrieb einer Röntgenröhre wird die Intensität der Strahlung durch die Höhe des Katodenstromes reguliert.)

Außer der Bremsstrahlung wird noch eine vom Anodenmaterial abhängige charakteristische Röntgenstrahlung erzeugt. Sie besitzt ein Linienspektrum, das das kontinuierliche Bremsstrahlungsspektrum überlagert.

Röntgenstrahlen treten auch bei anderen technischen Einrichtungen auf, sobald beschleunigte Elektronen abgebremst werden (z.B. bei Fernsehgerät, Oszilloskop, Elektronenbeschleuniger).

Abb. 3.5.3
Röntgenbremsspektren bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen [46, S. 47]

Strahlenart		Frequenz in s^{-1}	Wellenlänge in m	Energie in eV	Energie in J
Niederfrequenz	Hz	$3 \cdot 10^{0}$	10^{8}	$1{,}24 \cdot 10^{-14}$	$1{,}99 \cdot 10^{-33}$
Niederfrequenz	Hz	$3 \cdot 10^{1}$	10^{7}	$1{,}24 \cdot 10^{-13}$	$1{,}99 \cdot 10^{-32}$
Niederfrequenz	Hz	$3 \cdot 10^{2}$	10^{6}	$1{,}24 \cdot 10^{-12}$	$1{,}99 \cdot 10^{-31}$
Niederfrequenz	kHz	$3 \cdot 10^{3}$	10^{5}	$1{,}24 \cdot 10^{-11}$	$1{,}99 \cdot 10^{-30}$
Niederfrequenz	kHz	$3 \cdot 10^{4}$	10^{4}	$1{,}24 \cdot 10^{-10}$	$1{,}99 \cdot 10^{-29}$
Hochfrequenz (LW)	kHz	$3 \cdot 10^{5}$	10^{3}	$1{,}24 \cdot 10^{-9}$	$1{,}99 \cdot 10^{-28}$
Hochfrequenz (MW)	MHz	$3 \cdot 10^{6}$	10^{2}	$1{,}24 \cdot 10^{-8}$	$1{,}99 \cdot 10^{-27}$
Hochfrequenz (KW, UKW)	MHz	$3 \cdot 10^{7}$	10	$1{,}24 \cdot 10^{-7}$	$1{,}99 \cdot 10^{-26}$
Hochfrequenz (UKW)	MHz	$3 \cdot 10^{8}$	1	$1{,}24 \cdot 10^{-6}$	$1{,}99 \cdot 10^{-25}$
Höchstfrequenz (Radar)	GHz	$3 \cdot 10^{9}$	10^{-1}	$1{,}24 \cdot 10^{-5}$	$1{,}99 \cdot 10^{-24}$
Höchstfrequenz (Radar)	GHz	$3 \cdot 10^{10}$	10^{-2}	$1{,}24 \cdot 10^{-4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-23}$
Höchstfrequenz	GHz	$3 \cdot 10^{11}$	10^{-3}	$1{,}24 \cdot 10^{-3}$	$1{,}99 \cdot 10^{-22}$
Höchstfrequenz, IR	THz	$3 \cdot 10^{12}$	10^{-4}	$1{,}24 \cdot 10^{-2}$	$1{,}99 \cdot 10^{-21}$
IR	THz	$3 \cdot 10^{13}$	10^{-5}	$1{,}24 \cdot 10^{-1}$	$1{,}99 \cdot 10^{-20}$
IR	THz	$3 \cdot 10^{14}$	10^{-6}	$1{,}24 \cdot 10^{0}$	$1{,}99 \cdot 10^{-19}$
Licht, UV		$3 \cdot 10^{15}$	10^{-7}	$1{,}24 \cdot 10^{1}$	$1{,}99 \cdot 10^{-18}$
UV, Röntgenstrahlen		$3 \cdot 10^{16}$	10^{-8}	$1{,}24 \cdot 10^{2}$	$1{,}99 \cdot 10^{-17}$
Röntgenstrahlen		$3 \cdot 10^{17}$	10^{-9}	$1{,}24 \cdot 10^{3}$	$1{,}99 \cdot 10^{-16}$
Röntgenstrahlen, γ-Strahlen		$3 \cdot 10^{18}$	10^{-10}	$1{,}24 \cdot 10^{4}$	$1{,}99 \cdot 10^{-15}$
Röntgenstrahlen, γ-Strahlen, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{19}$	10^{-11}	$1{,}24 \cdot 10^{5}$	$1{,}99 \cdot 10^{-14}$
γ-Strahlen, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{20}$	10^{-12}	$1{,}24 \cdot 10^{6}$	$1{,}99 \cdot 10^{-13}$
Quanten der Höhenstrahlung, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{21}$	10^{-13}	$1{,}24 \cdot 10^{7}$	$1{,}99 \cdot 10^{-12}$
Quanten der Höhenstrahlung, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{22}$	10^{-14}	$1{,}24 \cdot 10^{8}$	$1{,}99 \cdot 10^{-11}$
Quanten der Höhenstrahlung, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{23}$	10^{-15}	$1{,}24 \cdot 10^{9}$	$1{,}99 \cdot 10^{-10}$
Quanten der Höhenstrahlung, energiereiche Strahlung		$3 \cdot 10^{24}$	10^{-16}	$1{,}24 \cdot 10^{10}$	$1{,}99 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 3.5.1
Spektrum elektromagnetischer Wellen

4 Wechselwirkungen von Strahlung mit Materie

Beim Auftreffen auf Materie wirken Strahlungsteilchen und Gammaquanten auf Hüllen oder Kerne der Atome ein und rufen an ihnen Veränderungen hervor. Dabei finden stets auch Rückwirkungen auf die Teilchen oder Quanten statt (z.B. Verringerung ihrer Energie, Änderung der Bewegungsrichtung). Man spricht deshalb allgemein von Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie. Sie sind für den Strahlenschutz von grundlegender Bedeutung.

Welche Wechselwirkungen stattfinden, ist von der Art der Strahlung, der Energie der Strahlungsteilchen bzw. Quanten und der Art des Wechselwirkungsmaterials abhängig. Häufig treten verschiedene Wechselwirkungen gleichzeitig auf, wobei meist eine Art überwiegt.

4.1 Wechselwirkungen von Alphateilchen mit Materie

Alphateilchen verlieren ihre Energie im wesentlichen dadurch, daß sie Atome oder Moleküle der durchstrahlten Materie ionisieren oder anregen.

Bei der Ionisierung eines Atoms wird ein Elektron aus seiner Hülle abgetrennt. Für diese Abtrennarbeit ist ein bestimmter Energiebetrag erforderlich. Wird dem Elektron mehr Energie zugeführt, als für die Abtrennung erforderlich ist, erhält das abgelöste Elektron die überschüssige Energie in Form von Bewegungsenergie. Sie kann so groß sein, daß das Elektron nun seinerseits ein weiteres Atom ionisiert (Sekundärionisation).
Durch die Abtrennung eines Elektrons aus der Atomhülle entsteht ein positives Ion. Das abgelöste Elektron kann sich an ein neutrales Atom anlagern, so daß sich ein negatives Ion bildet. Beide Ionen ergeben dann ein Ionenpaar (Abb. 4.1.1). Wieviel Energie zur Bildung eines Ionenpaares erforderlich ist, zeigt Tabelle 4.1.1.

Gas	H_2	He	N_2	O_2	Luft	Ar
Ionisierungs-energie in eV	36,3	41,1	34,7	31,1	34	26,1

Tabelle 4.1.1
Ionisierungsenergie für einige Elemente

Die Alphateilchen geben ihre Energie längs der Flugbahn nicht gleichmäßig ab, so daß die Anzahl der erzeugten Ionenpaare pro Weglänge auch nicht gleich ist. Die in Abb. 4.1.2 dargestellte Kurve steigt mit wachsender Weglänge erst langsam, dann schnell an, um am Ende steil abzufallen. Es bedeutet, daß die größte Anzahl der Ionenpaare pro Weglänge erst dann erzeugt wird, wenn das Alphateilchen bereits einen großen Teil seiner Bewegungsenergie verloren hat. Dieser Sachverhalt läßt sich vereinfacht dadurch erklären, daß sich langsame Teilchen längere Zeit in der Nähe der Atomhüllen aufhalten und verstärkt Ionisationen hervorrufen können.

Abb. 4.1.1
Ladungsverhältnisse bei der Bildung eines Ionenpaares

Energie der Teilchen in MeV	Ionenpaare / cm	
	bei Alphateilchen	bei Protonen
1	60 000	8 000
10	16 000	1 000

Tabelle 4.1.2
Erzeugung von Ionenpaaren pro Weglänge

Abb. 4.1.2
Ionenbildung längs der Bahn eines Alphateilchens in Luft

Bei der Anregung eines Atoms wird ein Hüllelektron vom Kern weiter entfernt und damit auf ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Zurückspringen auf das Ausgangsniveau wird die zugeführte Energie in Form eines Strahlungsquants (Photons) oder mehrerer Strahlungsquanten abgegeben (Abb. 4.1.3).

Abb. 4.1.3
Anregung eines Atoms durch ein Alphateilchen

Bei einer Ionisation oder Anregung gibt ein Alphateilchen Energie ab und wird dadurch langsamer. In Luft unter Normalbedingungen ist es nach 4 bis 7 cm auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst. Es kann dann an Atomhüllen keine Veränderungen mehr herbeiführen und ist deshalb für Organismen ungefährlich.

Ein abgebremstes Alphateilchen nimmt zwei freie Elektronen auf und wandelt sich dadurch in ein Heliumatom um.

$$He^{++} + 2e^{-} \rightarrow He$$

Eine durch Alphateilchen hervorgerufene Kernreaktion ist auf Seite 17 beschrieben worden (Pu-Be-Quelle).

4.2 Wechselwirkungen von Betateilchen mit Materie

Treffen Betateilchen auf Materie, treten Ionisation, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung auf. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung sind die wichtigsten Prozesse.

Bei einer Ionisierung ist die Anzahl der pro Weglänge erzeugten Ionenpaare 100 bis 1000mal kleiner als bei Alphateilchen. Betastrahlung gehört deshalb zu einer locker ionisierenden Strahlung im Gegensatz zu Alphastrahlen, die dicht ionisieren.

Energie der Teilchen in MeV	Ionenpaare / cm	
	bei Alphateilchen	bei Betateilchen
1	60 000	50
10	16 000	45

Tabbelle 4.2.1
Erzeugung von Ionenpaaren pro Weglänge

Ein Betateilchen muß also eine längere Strecke zurücklegen, um seine Energie durch Ionisationen abzugeben. Die Reichweite von Betastrahlen ist deshalb größer als die von Alphastrahlen. Da Betateilchen aber eine kontinuierliche Energieverteilung besitzen, kann keine einheitliche Reichweite angegeben werden. Sie liegt in Luft zwischen x · 1 cm und x · 10 m.

Auch bei Betateilchen steigt die Anzahl der gebildeten Ionenpaare, wenn sie sich verlangsamen. Es wird ein Maximum erreicht, wenn die Teilchen zur Ruhe kommen. Reicht die Energie eines Betateilchens nicht aus, um ein Atom zu ionisieren, kommt es zu einer Anregung.
Betateilchen können auch dadurch an Bewegungsenergie verlieren, daß sie im elektrischen Feld eines Atoms abgebremst werden. Die dabei verlorene Energie wird in Form eines Energiequants (Photons) abgegeben. (→ Röntgenbremsstrahlung, S. 18, 19).

Da Betateilchen eine sehr geringe Masse haben, werden sie bei Wechselwirkungen mit den Atomhüllen (Ionisation, Anregung) oder den Atomkernen (Strahlungsbremsung) aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung stark abgelenkt. Sie werden gestreut. Eine solche Ablenkung wird desto wahrscheinlicher, je geringer die Energie eines Elektrons ist. Sind die Betateilchen auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst, werden sie entweder von positiven Ionen eingefangen oder sie lagern sich an neutralen Atomen an und bilden dadurch negative Ionen.

4.3 Wechselwirkungen von Neutronen mit Materie

Neutronen besitzen keine elektrische Ladung. Sie sind elektrisch neutral und können deshalb auf die Atomhüllen des Wechselwirkungsmaterials nicht einwirken. Aus diesem Grund finden direkte Ionisationen und Anregungen nicht statt.
Die Wechselwirkungen der Neutronen mit Materie beruhen auf Zusammenstößen mit den Atomkernen. Die dabei auftretenden Vorgänge sind von der Energie der Neutronen abhängig. Da Neutronen vieler Energiequellen eine kontinuierliche Energieverteilung besitzen, werden meist mehrere Wechselwirkungsprozesse gleichzeitig auftreten.

Elastische Zusammenstöße finden im Energiebereich 10 keV bis 1 MeV statt. Die Summe der Bewegungsenergien der Stoßpartner vor und nach dem Stoß ist dann gleich: $W_1 = W_2 + W_3$. Zu unelastischen Zusammenstößen kommt es vorwiegend im Energiebereich zwischen 1 MeV und 10 MeV. Dabei ist die Summe der Bewegungsenergien vor und nach dem Stoß nicht gleich. Das Neutron hat den Atomkern angeregt, der die Anregungsenergie in Form eines Gammaquants wieder abgibt.

Ein Neutron kann seine Bewegungsenergie am besten auf einen Kern übertragen, wenn Kern und Neutron dieselbe Masse haben. Beim Kern eines Wasserstoffatoms (Proton) ist eine Energieübertragung zu fast 100% möglich.

Der von einem Neutron angestoßene Kern, der nun selbst Bewegungsenergie besitzt, wird Rückstoßkern genannt. Seine Bewegungsenergie kann so groß sein, daß er sich aus dem Atom- oder Molekülverband löst und andere Atome in seiner Umgebung ionisiert oder anregt. Wegen seiner großen Masse legt er dabei nur einen relativ kleinen Weg zurück, so daß eine sehr hohe Anzahl von Ionenpaaren pro Wegstrecke erzeugt wird.

Neutronen können von Atomkernen des Wechselwirkungsmaterials eingefangen werden, wodurch meist instabile Kerne entstehen. Sie wandeln sich wieder in stabile Kerne um, indem sie geladene Teilchen und oft gleichzeitig Gammaquanten aussenden.
Die Wahrscheinlichkeit für einen Neutroneneinfang ist von ihrer Bewegungsenergie abhängig. Sie ist meist desto größer, je langsamer die Neutronen sind. Das Neutron kann dann längere Zeit in Kernnähe verweilen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Einfangreaktion größer wird. Daneben gibt es noch den Resonanzeinfang, bei dem Neutronen ganz bestimmter Energie bevorzugt eingefangen werden (Abb. 4.3.3).

Abb. 4.3.1
Elastischer Stoß (W_1, W_2, W_3 : Bewegungsenergien)

Abb. 4.3.2
Unelastischer Stoß (W_1, W_2, W_3 : Bewegungsenergien)

Abb. 4.3.3
Die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang ist von der Neutronenenergie abhängig.
Der Wirkungsquerschnitt ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß eine bestimmte Kernreaktion eintritt. Seine Einheit ist 1 barn = 10^{-28} m^2 (scheinbare Fläche).

Eine für die Reaktorregelung und den Strahlenschutz wichtige Kernreaktion ist der Neutroneneinfang durch Bor (Abb. 4.3.4).

$$^1_0n + {}^{10}_5B \rightarrow {}^7_3Li + {}^4_2He + \gamma$$

Abb. 4.3.4
Kernreaktion beim Neutroneneinfang mittels Bor in den Regelstäben eines Reaktors

Die Alphateilchen wandeln sich durch Aufnahme von freien Elektronen in Helium um.

Die Abnahme der Borkonzentration in den Regelstäben eines Reaktors und der Anstieg des Drucks durch das entstehende Helium begrenzen die Lebensdauer der Regelstäbe. Die Lebensdauer von Regelstäben in Siedewasserreaktoren liegt bei > 10 Jahren.

Der Sauerstoff–16, der im Kühlmittel eines Siedewasserreaktors enthalten ist, wandelt sich z. T. durch Neutroneneinfang in Stickstoff–16 um. Er ist radioaktiv (HWZ 7,13 s), so daß besondere Strahlenschutzmaßnahmen getroffen werden müssen (Abb. 4.3.5).

$$^{16}_{8}O + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{16}_{7}N + ^{1}_{1}p$$

Abb. 4.3.5
Aktivierung von Sauerstoff durch Neutronen

Stickstoff–16 zerfällt unter Aussendung eines Betateilchens zu Sauerstoff–16. Gleichzeitig werden sehr energiereiche Gammaquanten abgegeben.

$$^{16}_{7}N \rightarrow ^{16}_{8}O + ^{0}_{-1}e + \gamma$$

HWZ 7,13 s

Metallteile und Beton, die zum Aufbau eines Kernkraftwerkes verwendet werden, können durch Neutronenbestrahlung ebenfalls radioaktiv werden und dann über eine mehr oder weniger lange Zeit Strahlung aussenden.

Beispiel 1:

$$^{58}_{26}Fe + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{59}_{26}Fe + \gamma \quad \text{(Aktivierung)}$$

$$^{59}_{26}Fe \rightarrow ^{59}_{27}Co + ^{0}_{-1}e + \gamma \quad \text{(rad. Zerfall)}$$

HWZ 45,1 d

Beispiel 2:

$$^{44}_{20}Ca + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{45}_{20}Ca + \gamma \quad \text{(Aktivierung)}$$

$$^{45}_{20}Ca \rightarrow ^{45}_{21}Sc + ^{0}_{-1}e + \gamma \quad \text{(rad. Zerfall)}$$

HWZ 163 d

Abb. 4.3.6
Aktivierung von Eisen durch Neutronen

Für die Absorption thermischer Neutronen in Körpergewebe sind hauptsächlich die Reaktionen

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{2}_{1}H + \gamma \quad \text{und}$$

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p$$

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}e \quad \text{verantwortlich.}$$

Abb. 4.3.7
Neutroneneinfang durch H–1

Abb. 4.3.8
Aktivierung von Stickstoff durch Neutronen

Bemerkenswert an der ersten Reaktion ist, daß sie zu einem stabilen Erdkern führt.

4.4 Wechselwirkungen von Gammastrahlen mit Materie

Durchdringt Gammastrahlung Materie, finden eine Reihe von Wechselwirkungsprozessen mit den Hüllelektronen und den Atomkernen statt.

Die Energien der Gammaquanten, die von natürlichen und künstlichen Radionukliden bzw. bei Wechselwirkungsprozessen emittiert werden, liegen im Bereich von 0,003 MeV und etwa 17 MeV. Abhängig von der Quantenenergie treten im wesentlichen drei Wechselwirkungsprozesse auf: der Photoeffekt, der Comptoneffekt und der Paarbildungseffekt. Diese drei Effekte überlagern sich im Wechselwirkungsmaterial, wobei in einzelnen Energiebereichen einer der Prozesse überwiegt.

Photoeffekt

Beim Photoeffekt, der vorherrschend bei kleinen Quantenenergien und großen Kernladungszahlen des Absorbermaterials auftritt, kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen den Quanten und den Elektronen der Atomhüllen.

Die Energie eines von der Hülle aufgenommenen Quants dient zur Abspaltung eines Elektrons (oder mehrerer Elektronen). Überschüssige Energie erhält das abgetrennte Elektron als Bewegungsenergie. Der Photoeffekt führt also zu einer Ionisation (Abb. 4.4.1).

Abb. 4.4.1
Photoeffekt

Beim Photoeffekt verschwindet das Gammaquant. Das frei werdende Elektron wird Photoelektron genannt. Es gibt seine Energie durch Anregung oder Ionisation an die Atome der Umgebung ab (Sekundärstrahlung).

Der Photoeffekt findet bevorzugt an Elektronen der kernnahen Schalen (überwiegend der K-Schale) statt. Das Atom besitzt dann an dieser Stelle eine Lücke, in die ein Elektron aus einer weiter außen liegenden Schale springt. Die dabei frei werdende Energie wird als Röntgenquant emittiert. Diese Strahlung wird Röntgen-Fluoreszenzstrahlung genannt (Abb. 4.4.2). Sie kann entweder das Wechselwirkungsmaterial verlassen oder weitere Photoeffekte hervorrufen.

Abb. 4.4.2
Entstehung der Röntgenfluoreszenzstrahlung

Comptoneffekt

Gammaquanten mittlerer Energie rufen im Wechselwirkungsmaterial vorwiegend den Comptoneffekt hervor. Dabei überträgt das Quant einen Teil seiner Energie auf ein in der äußeren Schale der Atomhülle sitzendes Elektron, das dadurch vom Atom abgetrennt wird (Comptonelektron). Das Quant besitzt nach der Einwirkung auf das Elektron eine verringerte Energie (größere Wellenlänge) und bewegt sich mit veränderter Flugrichtung weiter (Abb. 4.4.3).

Abb. 4.4.3
Comptoneffekt

Das Atom, an dem die Comptonstreuung stattgefunden hat, verliert ein Elektron seiner Hülle und wird dadurch ionisiert.

Das gestreute Gammaquant kann weitere Comptoneffekte hervorrufen, bis seine Energie so niedrig geworden ist, daß es durch einen Photoeffekt ganz aufgezehrt wird.
Das Comptonelektron kann im Wechselwirkungsmaterial zu Ionisationen und Anregungen führen.

Da beim Photoeffekt und beim Comptoneffekt Gammaquanten mit Hüllelektronen reagieren, ist der Unterschied zwischen beiden Effekten noch einmal in einer Tabelle zusammengestellt (Tabelle 4.4.1).

Photoeffekt	Comptoneffekt
Ein Gammaquant wirkt auf ein kernnahes Elektron ein.	Ein Gammaquant wirkt auf ein äußeres Elektron ein.
Das Gammaquant überträgt seine gesamte Energie auf das Elektron und verschwindet dabei. (Abtrennarbeit, Beschleunigung des Elektrons.)	Das Gammaquant überträgt einen Teil seiner Energie auf das Elektron (Abtrennarbeit praktisch Null, Beschleunigung des Elektrons) und wird als Quant mit niedrigerer Frequenz (größerer Wellenlänge) gestreut.
Das Elektron wird vom Atom losgelöst (Ionisation).	Das Elektron wird vom Atom losgelöst (Ionisation).
Das Photoelektron kann weitere Wechselwirkungen verursachen.	Das Comptonelektron kann weitere Wechselwirkungen verursachen.

Tabelle 4.4.1
Vergleich von Photoeffekt und Comptoneffekt bei Gammaquanten

Paarbildung

Bei höherer Quantenenergie überwiegt im Wechselwirkungsmaterial der Paarbildungseffekt. Dabei wird das Quant im elektrischen Feld eines Atomkerns vernichtet und in ein Elektron und ein Positron umgewandelt (Abb. 4.4.4).

Abb. 4.4.4
Paarbildung

Ein Quant muß mindestens eine Energie von 1,022 MeV besitzen, um die beiden Teilchen erzeugen zu können.

Überschüssige Quantenenergie übernehmen Elektron und Positron als Bewegungsenergie. Bei einer Energie W > 2,044 MeV können auch zwei Teilchenpaare erzeugt werden.
Der Paarbildungseffekt spielt vor allem bei Elementen mit hoher Ordnungszahl eine Rolle.

Das beim Paarbildungseffekt entstandene Positron hat eine relativ geringe Lebensdauer. Nach der Übertragung der Bewegungsenergie auf das Wechselwirkungsmaterial vereinigt es sich mit einem Elektron und zerstrahlt dabei in zwei Gammaquanten von je 0,511 MeV. Dieser Vorgang stellt die Umwandlung von Materie in Energie dar (Abb. 4.4.5).

Abb. 4.4.5
Elektron und Positron vereinigen sich und zerstrahlen.
Es entstehen zwei Gammaquanten.

Besitzen die bei Photoeffekt, Comptoneffekt oder Paarbildung erzeugten Elektronen genügend Energie und finden die Wechselwirkungen in einem Material mit höherer Ordnungszahl statt, kann dabei Bremsstrahlung erzeugt werden. Der primären Umwandlung von hoher Quantenenergie in kinetische Teilchenenergie folgt dann eine teilweise Rückumwandlung in Quanten niedriger Energie (Abb. 4.4.6).

Abb. 4.4.6
Umwandlung eines Gammaquants höherer Energie in kinetische Teilchenenergie und teilweise Rückumwandlung in ein Quant niedrigerer Energie

5 Strahlenmessung und Maßeinheiten

Der Mensch besitzt kein Sinnesorgan für ionisierende Strahlen. Sie lassen sich nur mit Hilfe besonderer Meßinstrumente nachweisen. Alle Strahlenschutzmaßnahmen müssen deshalb ständig von Strahlenmessungen begleitet werden.

Strahlenmessungen sind nur möglich, wenn Wechselwirkungen der Strahlung mit Materie stattfinden. Erst wenn die Strahlung eine nachweisbare Veränderung hervorruft, kann diese erfaßt werden. Der Grad der Veränderung ist dann ein Maß für die Intensität der verursachenden Strahlung. Einige besonders wichtige Meßverfahren werden hier in vereinfachter Form vorgestellt.

5.1 Ionisationskammer und Ionendosis

Eine Ionisationskammer besteht im einfachsten Fall aus einem luftgefüllten Behälter, in dem sich zwei Elektroden befinden. Sie sind über einen Strommesser mit einer Gleichspannungsquelle verbunden. Gelangt Strahlung in das Innere, werden Ionen erzeugt, und die Luft zwischen den Elektroden wird elektrisch leitend. Daraufhin kommt es zu einem Stromfluß, der durch ein Meßgerät angezeigt wird (Abb. 5.1.1).

In der Ionisationskammer werden positives Ion und herausgelöstes Elektron zur jeweils entgegengesetzt geladenen Elektrode hin beschleunigt. Die Spannung wird gerade so hoch gewählt, daß einerseits Ion und Elektron nicht mehr rekombinieren (sich wieder vereinigen) können, andererseits aber die Beschleunigung zu den Elektroden nicht so stark ist, daß durch Zusammenstöße mit Luftmolekülen weitere Ionisationen ausgelöst werden. Die Stromstärke ist dann allein der Anzahl der primär erzeugten Ionen bzw. Elektronen proportional. Die Stromstärken werden verstärkt und an einem Meßgerät mit geeigneter Skala angezeigt.

Zum Nachweis von Alpha- und Betateilchen werden die Wände der Ionisationskammer aus sehr dünnem Material hergestellt, damit die Teilchen möglichst ungehindert in das Innere gelangen können. Bei Gammaquanten wählt man dagegen dickere Wände, damit sie aus den Atomen der Kammerwand Elektronen herauslösen, die dann in der Luft weitere Ionisationen hervorrufen. Soll die Kammer näherungsweise den Verhältnissen in einem organischen Gewebe angepaßt werden, verwendet man für den Aufbau spezielle Kunststoffe.

Die durch Strahlung erzeugten Elektronen stellen eine Ladungsmenge dar. Die Ionendosis gibt die erzeugte Ladung pro Masse der durchstrahlten Luft an ($t = 0$ °C; $p = 1013$ hPa).

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{erzeugte Ladung}}{\text{Masse der durchstrahlten Luft}}$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Beispiel für die Entstehung eines Ladungsträgerpaares: $N_2 \rightarrow [N_2]^+ + e^-$

(→ Elektronenflußrichtung)

Abb. 5.1.1
Prinzipieller Aufbau einer Ionisationskammer

Abb. 5.1.2
Meßgerät mit Ionisationskammer zur Untersuchung eines Strahlenfeldes

Wenn in 1 kg Luft durch ionisierende Strahlen soviele Ionen bzw. freie Elektronen erzeugt werden, daß im angeschlossenen Leiterkreis 1 Sekunde lang ein Strom von 1 A fließt, beträgt die Ionendosis

$$I = \frac{1\ \text{A} \cdot 1\ \text{s}}{1\ \text{kg}}$$

Da 1 A · 1 s = 1 C ist, ergibt sich als Einheit für die Ionendosis

$$I = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{kg}} = \frac{10^{-3}\ \text{C}}{1\ \text{g}}$$

Das entspricht $6{,}25 \cdot 10^{18}$ Elektronen bzw. Ionen pro 1 kg Luft oder $8{,}071 \cdot 10^{12}$ Ionenpaare pro 1 cm^3 Luft.

Bisher wurde die Ionendosis in Röntgen (R) gemessen. Für Umrechnungen gilt:

$$1\ \text{R} = \frac{2{,}58 \cdot 10^{-4}\ \text{C}}{1\ \text{kg Luft}} \qquad \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{kg}} = 3{,}88 \cdot 10^{3}\ \text{R}$$

5.2 Energiedosis

In Luft wird zur Bildung eines Ionenpaares die Energie von 34 eV benötigt. Da der Quotient 1 C / 1 kg Auskunft darüber gibt, wieviel Ionenpaare erzeugt worden sind, läßt sich auch die Energie berechnen, die dafür notwendig war.

Statt die erzeugte Ladung oder die erzeugten Ionenpaare anzugeben, kann man also auch die Energie betrachten, die bei der Ionisation auf die Luftmoleküle übertragen worden ist. Die übertragenen Energiewerte sind jedoch auch

Abb. 5.2.1
Die Einheit der Energiedosis (D)

bei größeren Strahlendosen so klein, daß man eine Temperaturerhöhung der Luft auch mit den empfindlichsten Thermometern nicht feststellen könnte. Die jeweils übertragene Energie muß also stets berechnet werden.

Die von einem Stoff aufgenommene Energie kann ebenfalls als Maß für die physikalische Strahlenwirkung verwendet werden. Dafür ist die Energiedosis definiert worden.

Die Energiedosis einer ionisierenden Strahlung gibt die pro Masse eines durchstrahlten Stoffes absorbierte Energie an.

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}$$

$$D = \frac{\Delta W}{\Delta m}$$

Bei der in Abb. 5.2.1 dargestellten Energiedosis wird von der Masse 1 kg eine Energie von 1 J absorbiert. Der Quotient 1 J / 1 kg wird als Einheit für die Energiedosis verwendet. Als besonderer Einheitenname für die Energiedosis wurde das Gray (Gy) eingesetzt.

$$1\ \text{Gy} = \frac{1\ \text{J}}{1\ \text{kg}}$$

Die Energiedosis wurde bisher in der Einheit Rad (rd) gemessen. Das Wort Rad ergibt sich aus den Anfangsbuchstaben der englischen Wörter „**r**adiation **a**bsorbed **d**ose“. Die Einheit Rad ist seit 1986 im amtlichen Verkehr nicht mehr zulässig. Für Umrechnungen gilt:

$$1\ \text{rd} = 10^{-2}\ \text{Gy}$$

Für Röntgen- und Gammastrahlen mit Energien zwischen 0,2 MeV und 3 MeV gilt für Wasser und weiches Gewebe, daß der Ionendosis von 1 R die Energiedosis von etwa 10^{-2} Gy entspricht.

5.3 Die Äquivalentdosis

Ionisierende Strahlen können nur dann eine biologische Wirkung hervorrufen, wenn vom bestrahlten Objekt Energie aufgenommen worden ist.

Dabei gilt:
Je größer die Energieaufnahme, desto größer ist auch die Wirkung.

Mit der Energiedosis allein kann jedoch die biologische Strahlenwirkung nicht beurteilt werden. Es zeigt sich nämlich, daß bei gleichen Energiedosen aber unterschiedlichen Strahlenarten die hervorgerufenen Effekte unterschiedlich sein können.

Wird z.B. von zwei gleichen biologischen Objekten das ei-

ne mit Alphastrahlen, das andere mit Betastrahlen bestrahlt und nehmen beide Objekte gleich viel Energie auf, so sind die durch die Alphastrahlen hervorgerufenen biologischen Strahlenwirkungen etwa 20 mal größer (Abb. 5.3.1).

Abb. 5.3.1
Bei gleicher Energiedosis rufen Alphastrahlen eine 20mal größere biologische Wirkung hervor als Betastrahlen (stark vereinfachte Darstellung einer Zellstruktur)

Setzt man dagegen zwei gleiche biologische Objekte solange einer Alpha- bzw. einer Betastrahlung aus, daß gleiche biologische Wirkungen auftreten, sind die aufgenommenen Energiedosen unterschiedlich (Abb. 5.3.2).

Abb. 5.3.2
Die aufgenommenen Energiedosen sind unterschiedlich, wenn Alpha- und Betastrahlen gleiche biologische Wirkungen hervorrufen (vereinfachte Darstellung einer Zellstruktur)

Die größere biologische Wirkung von Alphastrahlen kann durch die größere Anzahl erzeugter Ionen bzw. Anregungen pro Weglänge erklärt werden. Ein Alphateilchen führt in einer Zelle zu etwa 1 000mal mehr Wechselwirkungen als ein Betateilchen. Eine dichtere Ionisierung in einem kleinen Zellbereich ist aber viel schädlicher als eine gleich große Anzahl von Ionisationen, die auf einen größeren Bereich verteilt sind.

Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen biologischen Wirkung der verschiedenen Strahlenarten sind Qualitätsfaktoren $\bar{Q}$ festgelegt worden. Es sind aus Experimenten gewonnene Erfahrungswerte (Tabelle 5.3.1).

Strahlenarten	$\bar{Q}$
Röntgen- und Gammastrahlung, Betastrahlung	1
Neutronenstrahlung	10
Alphastrahlung aus Radionukliden	20

Tabelle 5.3.1
Werte des effektiven Qualitätsfaktors $\bar{Q}$

Energiedosis und Qualitätsfaktor werden durch die Äquivalentdosis H verknüpft. Sie ergibt sich aus der Energiedosis D, multipliziert mit dem Qualitätsfaktor $\bar{Q}$.

$$H = D \cdot \bar{Q}$$

Die biologische Strahlenwirkung ist nur dann ausschließlich von Energiedosis und Strahlenart abhängig, wenn einheitliche Versuchsbedingungen vorliegen.

Je höher die Energiedosis und je größer der Qualitätsfaktor ist, desto größer ist die Äquivalentdosis und damit die biologische Strahlenwirkung (Abb. 5.3.3).

Abb. 5.3.3
Berechnung der Äquivalentsdosis bei Gammastrahlen an einem Beispiel

Da der Qualitätsfaktor ein Zahlenwert ohne Einheit ist, ergibt sich als Einheit der Äquivalentdosis der Quotient J / kg (dieselbe Einheit wie für die Energiedosis). Um kenntlich zu machen, daß eine Dosis eine Äquvalentdosis ist, wird der Einheitenname Sievert (Sv) benutzt.

Als Einheit der Äquivalentdosis diente früher das Rem (rem = röntgen equivalent man). 1 rem entsprach der Energiedosis von 1 rd, multipliziert mit dem Qualitätsfaktor 1.

Für Umrechnungen gilt:

1 rem = 0,01 Sv 100 rem = 1 Sv

1 mrem = 0,01 mSv 100 mrem = 1 mSv

Bei der Äquivalentdosisleistung wird die Äquivalentdosis auf eine bestimmte Zeitspanne bezogen, z.B.:

Sv / h (rem / h), Sv / d (rem / d), Sv / a (rem / a).

Bei externen und internen Bestrahlungen von Menschen werden einzelne Organe bzw. Gewebebereiche unterschiedlich belastet. Da ihre Strahlenempfindlichkeit z. T. erhebliche Unterschiede aufweist, liefern Organ- bzw. Teilkörperdosen unterschiedliche Beiträge zum strahlenbedingten Gesamtrisiko (was die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Schadens betrifft, z. B. Krebs, Leukämie).

Zur Berechnung des tatsächlichen (effektiven) Strahlenrisikos hat man deshalb für Organe und Gewebe Wichtungsfaktoren festgelegt. Mit ihnen werden die Beiträge zur effektiven Äquivalentdosis berechnet. Dazu multipliziert man die einzelnen Organdosiswerte mit den Wichtungsfaktoren und addiert anschließend die erhaltenen Produkte.

Organ / Gewebe	Wichtungsfaktor
Keimdrüsen	0,25
Brust	0,15
rotes Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Schilddrüse	0,03
Knochenoberfläche	0,03
Übrige Organe und Gewebe[1]	0,30

[1] Es werden nur die 5 am stärksten belasteten Organe oder Gewebe berücksichtigt

Tabelle 5.3.2
Wichtungsfaktoren zur Berechnung der effektiven Äquivalentdosis

Angenommenes Beispiel:

Durch Aufnahme von I–131 mit der Nahrung ist die Schilddrüse einer Person mit 100 mSv belastet worden. Es ergibt sich dann eine effektive Äquivalentdosis

$$H_e = 100 \text{ mSv} \cdot 0{,}03 = 3 \text{ mSv (300 mrem)}.$$

Bei einer Ganzkörperbestrahlung mit 3 mSv ergäbe sich das gleiche Schadensrisiko.

5.4 Bestimmung der Impulsrate mit einem Zählrohr

Ionisationskammern können auch als Zählrohre gebaut werden (z.B. Geiger-Müller-Zählrohr) (Abb. 5.4.1).

Ein verschlossenes Metallrohr oder ein Glasrohr mit innen aufgedampftem Metallbelag bildet die Katode, ein dünner, im Innern axial angebrachter Draht die Anode. Damit Strahlungsteilchen in das Innere gelangen können, ist die Rohrwand sehr dünn oder es gibt ein besonders dünnes Strahleneintrittsfenster. Gammaquanten können dagegen auch ein Metallrohr durchdringen und dabei Elektronen aus den Atomhüllen abtrennen. Das Ionisationsvermögen von Quanten ist energieabhängig und etwa 100mal kleiner als das von Alpha- oder Betateilchen.

Als Gasfüllung verwendet man Gemische aus Edelgasen mit Zusätzen von Alkoholdampf oder Halogenen bei Unterdruck. Die Spannung beträgt 500 bis 600 V.

Ionen, die im Innern des Rohres durch Strahlung entstanden sind, werden durch die Spannung so stark beschleunigt, daß lawinenartig weitere Ionisationen entstehen. Ein Ionenpaar kann dabei bis zu 10^8 Elektronen bzw. Ionen erzeugen. Es entsteht also ein recht kräftiger Stromstoß, der am Widerstand einen Spannungsabfall verursacht. Er wird elektronisch weiter verarbeitet und durch ein Zählgerät registriert. Dadurch ist es möglich, die Teilchenzahl zu zählen.

Solange im Zählrohr eine Entladung stattfindet, kann kein weiteres Teilchen registriert werden. Die Zeit, die vergeht, bis das Zählrohr nach der Registrierung eines Teilchens wieder arbeitsbereit ist, wird Totzeit genannt (pos. Ionen müssen zur Katode wandern, Spannung zwischen Katode und Anode muß sich wieder aufbauen). Bei hochwertigen Zählrohren ist die Totzeit $< 10^{-4}$ s.

Die Anzahl der Stromimpulse, die mit einem Zählrohr registriert werden, wird Impulsrate genannt.

Abb. 5.4.1
Schnitt durch ein gasgefülltes Zählrohr

Zur Überwachung großer Flächen (Hände, Schuhsohlen, Kleidung, Tischflächen usw.) werden Zählrohre mit z.T. sehr großen Strahleneintrittsfenstern verwendet. Es sind meist großflächige Durchflußzählrohre. Der Zählraum besteht aus einem flachen Körper von etwa 15 mm Höhe. Er ist auf der einen Seite mit einem Strahleneintrittsfenster aus metallbedampfter sehr dünner Kunststoffolie abgeschlossen (Abb. 5.4.2).

Abb. 5.4.2
Großflächiges Methandurchflußzählrohr

Durch die Durchflußzählrohre strömt Methan oder ein Argon-Methan-Gemisch. Die Anzahl der pro Zeiteinheit registrierten Teilchen oder Gammaquanten liegt desto höher, je größer das Strahleneintrittsfenster ist. Durchflußzähler lassen sich auch zu größeren Einheiten zusammenschalten (Abb. 5.4.3).

Abb. 5.4.3
Ganzkörper-Monitor

5.5 Aktivität und spezifische Aktivität

Strahlungsteilchen und Strahlungsquanten, die bei Kernumwandlungen entstehen, werden von einer radioaktiven Substanz willkürlich nach allen Seiten ausgesandt. Ein Zählrohr kann also immer nur einen Teil der Strahlung registrieren.

Um neben der Impulsrate auch angeben zu können, wie strahlungsaktiv eine untersuchte radioaktive Strahlenquelle insgesamt ist, hat man die Aktivität definiert.

Die Aktivität gibt die Anzahl der Kernumwandlungen pro Zeit an. Da bei jeder Kernumwandlung ein Teilchen oder Quant ausgesandt wird, ist damit auch die Anzahl der erzeugten Teilchen bzw. Gammaquanten angegeben.

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta t}$$

Die Anzahl der Kernumwandlungen wird als Zahlenwert ohne Einheit angegeben. Für die Zeit wird als Einheit die Sekunde gewählt. Die Einheit der Aktivität ist also $1 / \mathrm{s} = \mathrm{s}^{-1}$ (reziproke Sekunde). Als besonderer Einheitenname für die Aktivität wurde das Becquerel (Bq) eingeführt.

$$1\ \mathrm{Bq} = 1 \cdot \mathrm{s}^{-1}$$

Der Wert in Becquerel gibt also die Anzahl der Kernumwandlungen pro Sekunde an.

In Abb. 5.5.1 wird davon ausgegangen, daß in einer bestimmten Menge radioaktiver Atome (nur die Kerne sind dargestellt) in 4 s 4 Kernumwandlungen stattfinden. Die Aktivität beträgt dann:

$$A = \frac{4}{4\ \mathrm{s}} = \frac{1}{1\ \mathrm{s}} = 1 \cdot \mathrm{s}^{-1} = 1\ \mathrm{Bq}$$

Bei 10 Kernumwandlungen pro Sekunde ergibt sich eine Aktivität von 10 Bq, bei 1000 Kernumwandlungen pro Sekunde eine Aktivität von 1000 Bq = 1 kBq.

Bis Ende 1985 durfte im amtlichen Verkehr noch die Einheit Curie (Ci) verwendet werden. Da die bisher geschriebenen Bücher ausschließlich diese Einheit verwendet haben, werden die Umrechnungsmöglichkeiten angegeben.

1 Curie (Ci) $= 10^{0}$ Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq
1 Millicurie (mCi) $= 10^{-3}$ Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{7}$ Bq
1 Mikrocurie (µCi) $= 10^{-6}$ Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{4}$ Bq
1 Nanocurie (nCi) $= 10^{-9}$ Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{1}$ Bq
1 Pikocurie (pCi) $= 10^{-12}$ Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{-2}$ Bq

Bei sehr kurzer Halbwertszeit eines Radionuklids nimmt seine Aktivität relativ schnell ab. So hat z.B. 1 pg (1 Billionstel Gramm) I–131 eine Aktivität von rund 4600 Bq. Da die Halbwertszeit von I–131 8,02 d beträgt, ist die I–131-Aktivität nach dieser Zeit auf 2300 Bq gesunken, nach weiteren 8,02 d auf 1150 Bq usw.

Kern-umwandlungen $\Delta n = 4$

Zeit: $\Delta t = 4$ s

$$\text{Aktivität} = \frac{\text{Anzahl der Kernumwandlungen}}{\text{Zeit}}$$

$$A = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{4}{4\,\text{s}} = 1 \cdot \text{s}^{-1} = 1\ \text{Bq}$$

Abb. 5.5.1
Definition der Aktivität

1 kg

$$A_{sp.} = \frac{A}{m}$$

oder:

$$A_{sp.} = \frac{A}{V}$$

Abb. 5.5.2
Definition der spezifischen Aktivität

Viele Radionuklide bilden nach ihrer Umwandlung Tochterkerne, die wiederum radioaktiv sind. So wandelt sich z.B. Ra–226 in das radioaktive Edelgas Rn–222 um. Aktivitätsangaben für ein Radionuklid beziehen sich aber immer auf die Ausgangssubstanz, nicht auf die beim Älterwerden angesammelten Folgeprodukte.

In einer radioaktiven Substanz ist die Anzahl der Kernumwandlungen desto größer, je größer die Substanzmenge ist. Die Tabellen 5.5.1 und 5.5.2 zeigen, daß die Aktivität der Masse bzw. dem Volumen proportional ist.

Masse von I–131	Aktivität in Bq
1 pg	ca. $4{,}6 \cdot 10^{3}$
1 ng	ca. $4{,}6 \cdot 10^{6}$
1 µg	ca. $4{,}6 \cdot 10^{9}$
1 mg	ca. $4{,}6 \cdot 10^{12}$
1 g	ca. $4{,}6 \cdot 10^{15}$

Tabelle 5.5.1
Die Aktivität ist von der Masse des Radionuklids abhängig

Luftvolumen geschlossener Räume	natürliche Gesamtaktivität in Bq (Mittelwerte)
1 m^3	50
62,5 m^3 (Wohnraum 5 m · 5 m · 2,5 m)	3125
240 m^3 (Klassenraum 10 m · 8 m · 3 m)	12000
6000 m^3 (Turnhalle 20 m · 30 m · 10 m)	300000

Tabelle 5.5.2
Natürliche Gesamtaktivität verschiedener Luftvolumina

Die Aktivität pro Masse, Fläche oder Volumen wird als spezifische Aktivität bezeichnet. Sie gibt die Kernumwandlungen an, die in einer Sekunde in 1 g (1 kg, 1 t usw.), auf 1 cm^2 (dm^2, m^2 usw.) bzw. in 1 cm^3 (1 l, 1 m^3 usw.) stattfinden. Dementsprechend gelten die Einheiten Bq/g, Bq/kg, Bq/t oder Bq / cm^2, Bq / m^2 bzw. Bq / cm^3, Bq / l, Bq / m^3.

Eine Angabe über die spezifische Aktivität kann sich auf die Gesamtheit der in einer Substanzmenge enthaltenen Radionuklide (Gesamtaktivität) oder auf ein einzelnes Radionuklid beziehen. Es muß immer mit angegeben werden.

Radionuklid	spezifische Aktivität in Bq / g
H–3	$3{,}6 \cdot 10^{14}$
C–14	$1{,}7 \cdot 10^{11}$
Fe–59	$1{,}8 \cdot 10^{15}$
Co–60	$4{,}1 \cdot 10^{13}$
Kr–85	$1{,}4 \cdot 10^{13}$
Sr–90	$5{,}3 \cdot 10^{12}$
I–131	$4{,}6 \cdot 10^{15}$
Xe–133	$6{,}8 \cdot 10^{15}$
Cs–134	$4{,}8 \cdot 10^{13}$
Cs–137	$3{,}2 \cdot 10^{12}$
U–nat	$2{,}54 \cdot 10^{4}$
Pu–239	$2{,}3 \cdot 10^{9}$
K–nat (K–40)	$3{,}04 \cdot 10^{1}$

Tabelle 5.5.3
Spezifische Aktivität einiger Radionuklide (gerundete Werte)

5.6 Aktivitätsbestimmung

Die spezifische Aktivität eines Stoffes (z.B. von Nahrungsmitteln) kann mit Hilfe eines Zählrohres bestimmt werden. Dazu muß ein besonderes Meßverfahren angewandt werden. Es ist in Abb. 5.6.1 in vereinfachter Form dargestellt.

Zunächst wird die Meßapparatur kalibriert. Dazu beschafft man sich eine Eichlösung, deren spezifische Aktivität genau bekannt ist (z.B. Lösung mit Cs–134, $A_{sp.}$ = 540 Bq/g). Von dieser Lösung entnimmt man z.B. genau 1 g, das man mit Wasser auf 1 l (1 kg) auffüllt. Das Wasser hat jetzt eine spezifische Aktivität von 540 Bq / kg (natürliche Aktivität nicht mitgerechnet). Anschließend wird ein dünnwandiges Zählrohr in die Flüssigkeit getaucht und die Impulsrate ermittelt. Es wird angenommen, daß sie z. B. 781 200 / h = 217 / s beträgt. Da im gesamten Wasser aber 540 Kernumwandlungen pro Sekunde stattfinden, ist demnach nur ein Teil der Strahlung vom Zählrohr registriert worden. Die Impulsrate muß also jeweils mit dem Korrekturfaktor

$$k = \frac{540}{217} = 2{,}488$$

multipliziert werden, um die tatsächliche Aktivität der Flüssigkeit zu erhalten.

In einem zweiten Schritt wird der Probenbehälter entleert, gesäubert und z. B. mit 1 l (1 kg) Milch gefüllt. Man taucht das Zählrohr erneut ein und bestimmt die Impulsrate. Sie soll hier z. B. 390 600 / h = 108,5 / s betragen. Da der Korrekturfaktor 2,488 beträgt, finden in der Milch 108,5 / s · 2,488 = 270 / s statt. Es ergibt sich also eine spezifische Aktivität von $A_{sp.}$ = 270 Bq / kg. Diese Angabe sagt jedoch nichts darüber aus, welche Radionuklide in der Milch vorliegen.

Durch die Glaswand des Zählrohres gelangen nur die Gammaquanten und die energiereichen Betateilchen. Bei reinen Alphastrahlern oder reinen Betastrahlern muß ein anderes Meßverfahren gewählt werden.

Abb. 5.6.1
Bestimmung der spezifischen Aktivität (vereinfachte Darstellung)

5.7 Bestimmung von Radionukliden mit der Gammaspektroskopie

Bei der Bestimmung der Gesamtaktivität kann man nicht angeben, welche Radionuklide die Strahlung verursacht haben. Da die einzelnen Radionuklide aber für den Menschen unterschiedlich gefährlich sind, muß man sie aus Gründen des Strahlenschutzes einzeln bestimmen.

Durch chemische Analysen lassen sich die Radionuklide nicht ermitteln, weil es sich in der Regel um extrem kleine Mengen (Milliardstel Gramm) handelt und weil radioaktive und nichtradioaktive Nuklide eines Elements sich chemisch identisch verhalten.

Die einzelnen Radionuklide senden aber (von wenigen Ausnahmen abgesehen) bei der Kernumwandlung Gammaquanten mit ganz charakteristischen Energien aus.

Wenn man also ihre Energie bestimmt, weiß man, welches Radionuklid in dem untersuchten Stoff vorhanden ist. Dazu sucht man zu den ermittelten Energiewerten in einer Tabelle die dazugehörigen Radionuklide auf.

Zur Bestimmung der Gammaenergie kann z.B. ein Szintillationszähler oder ein Halbleiterdetektor verwendet werden. Hier wird der Halbleiterdetektor näher erläutert. (Abb. 5.7.1)

Der Halbleiterdetektor besteht im Prinzip aus einer Halbleiterdiode, die in Sperrichtung betrieben wird. Dringt ein Gammaquant in die Sperrschicht, werden in ihr Elektronen-Loch-Paare erzeugt. Bei Silicium beträgt die Energie dafür 3,23 eV, bei Germanium 2,84 eV.

Der dadurch hervorgerufene geringe Strom in Sperrichtung führt an einem Arbeitswiderstand zu einem Spannungsabfall, der sich elektronisch weiter verarbeiten läßt.

Jedes Gammaquant erzeugt einen Spannungsimpuls, der gezählt werden kann. Die Amplitude des Spannungsimpulses ist proportional zur Energie, die das Quant an das Halbleitermaterial abgegeben hat.

Wird die gesamte Energie eines Gammaquants im Halbleitermaterial aufgezehrt, ist die Höhe des Spannungsimpulses der Energie des Quants proportional.

Radionuklid	Energie der Gammaquanten in keV
Na−22	1275
Co−60	1332; 1173 ...
K−40	1461
Sr−90	kein γ
Cs−134	605; 796; 569 ...
Cs−137 / Ba−137 m	662
I−131	364; 637; 284
N−16	6129; 7115
Ra−226	186 (262 ...)
U−238	(50)

Tabelle 5.7.1
Energie der Gammaquanten einiger Radionuklide (Reihenfolge gibt die Häufigkeit an / Intensitäten unter 1 % in Klammern)

Abb. 5.7.1
Vereinfachte Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Gammaspektroskopie

Zur Unterscheidung der Energie der Gammaquanten müssen also die Spannungsimpulse nach ihrer Höhe „elektronisch sortiert“ werden. Das geschieht mit Hilfe eines Computers. Über einen Bildschirm oder einen Drucker erhält man dann eine Darstellung, wie sie Abb. 5.7.2 zeigt. Auf der x-Achse sind die Gammaenergien in Form schmaler Kanäle angegeben, auf der y-Achse die Anzahl der Impulse, die von Quanten bestimmter Energie erzeugt worden sind. Bei dem hier untersuchten Stoff wurden Gammaquanten nachgewiesen, die von Cs–134, Cs–137 und I–131 herrühren.

Damit in Halbleiterdetektoren durch die Umgebungswärme nicht unkontrolliert Elektronen-Loch-Paare entstehen, muß der Kristall mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden. Zur Herabsetzung der natürlichen Umgebungsstrahlung wird außerdem eine 5 cm dicke Bleiabschirmung eingesetzt. Halbleiterdetektoren, mit denen Alpha- und Betateilchen nachgewiesen werden sollen, müssen eine Sperrschicht dicht unter der Oberfläche des Kristalls besitzen.

5.8 Stabdosimeter

Nach dem Prinzip der Ionisationskammer arbeiten auch die Stabdosimeter (Taschendosimeter), die noch gelegentlich zum Schutz von Personen eingesetzt werden. Es handelt sich um füllhalterähnliche Meßgeräte, in denen sich ein Elektrometer (Elektroskop) befindet.

Man lädt es an einer Spannungsquelle auf, so daß sich das bewegliche Fädchen spreizt. Auf einer durchsichtigen Skala wird dann der Wert Null angezeigt.

Treffen Gammastrahlen das Dosimeter, entlädt sich das Elektrometer, und die Spannung an ihm sinkt. Das ist am Rückgang des gespreizten Fädchens zu erkennen.

Je mehr sich das Elektrometer entlädt, desto stärker geht das Fädchen zurück. Die Skala ist in µSv kalibriert, so daß sofort die Äquivalentdosis abgelesen werden kann (Abb. 5.8.1).

Abb. 5.7.2
Gamma-Energie-Spektrum von Käse (Hamburg, 26.6.1986) (n: Anzahl der Impulse pro Energieintervall)

Abb. 5.8.1
Prinzipaufbau eines Stabdosimeters

Solange keine Bestrahlung erfolgt, beträgt der Spannungsrückgang durch Selbstentladung und die natürliche Umgebungsstrahlung nur wenige Prozent.

Für Messungen von Gammastrahlen niedriger Energie werden Stabdosimeter mit speziellen Kunststoffbehältern verwendet.

5.9 Filmdosimeter

Filmdosimeter (in der Regel als amtliche Dosismeter verwendet) bestehen aus einer dünnen, lichtdichten Kunststoffkassette, in der sich zwei Filmabschnitte befinden. In der Kassette sind außerdem einige Metallfilter untergebracht. Gammastrahlen, die in das Innere gelangen, rufen eine Schwärzung des Films hervor. Aus ihr läßt sich nachträglich ermitteln, wie groß die erhaltene Strahlendosis gewesen ist.

Abb. 5.9.1
Filmdosimeter im Original und als vereinfachte Schnittzeichnung in Seitenansicht

Die Gammaquanten lösen in der Kunststoffwand, in den Filtern und im Film Elektronen aus, die dann in der Silberbromid-Schicht Ionisationen bewirken. Dadurch kommt es zu Molekülveränderungen. Bei der Entwicklung des Films entstehen an diesen Stellen Silberkörnchen. Sie sind für Licht undurchlässig und rufen eine Trübung des Films hervor. Sie ist von der Energie und der Menge der einfallenden Quanten abhängig. Die Auswertung der Trübungsunterschiede wird mit speziellen Geräten vorgenommen und die Ionendosis mit Hilfe eines Computers berechnet.
Um die Energie der einfallenden Quanten bestimmen zu können, sind Teile des Films mit verschiedenen Metallfiltern abgedeckt. Dadurch entstehen einzelne Felder. Je größer die Energie der Quanten ist, desto mehr Felder des Films werden getrübt. Bei sehr großen Energien spielen praktisch nur noch die erzeugten Comptonelektronen eine Rolle. Es kommt dann nur noch zur Trübung des Feldes, das durch den dicksten Metallfilter abgeschirmt ist.
Die an der Vorder- und Rückseite versetzt angeordneten Bleifilter ermöglichen es festzustellen, aus welcher Richtung die Strahlung gekommen ist. Kam sie von hinten, muß zusätzlich bedacht werden, daß sie dann den menschlichen Körper vollständig durchdrungen hat.

5.10 Neutronenmeßgeräte

Neutronen sind nicht in der Lage, Atome direkt zu ionisieren. Um sie nachzuweisen, läßt man sie Kernreaktionen oder Kernspaltungen ausführen. Die dabei erzeugten geladenen Teilchen (Alphateilchen, Trümmerkerne) bewirken dann in der Gasfüllung Ionisationen.

Zählrohre zum Nachweis von thermischen Neutronen bestehen aus einem gasgefüllten, verschlossenen Aluminium- oder Messingrohr. Seine Innenseite ist mit Bor, Lithium oder Uran–235 belegt. Es ist auch möglich, das Rohr mit dem Gas BF_3 zu füllen. Es kommt dann zu folgenden Primärreaktionen:

Rohrauskleidung mit Bor oder Gasfüllung BF_3:

$$^{10}_{5}B + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}He$$

Rohrauskleidung mit Lithium:

$$^{9}_{3}Li + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{4}_{2}He$$

Rohrauskleidung mit Uran–235, z. B.:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

Die erzeugten Alphateilchen bzw. die von den Spaltprodukten ausgesandten Teilchen lösen dann im Zählrohr Ionisationen aus.

Schnelle Neutronen können z.B. durch einen Paraffinmantel abgebremst werden, der um das Zählrohr gelegt wird. Durch wachsende Dicken von Kunststoffumhüllungen, die Neutronen abbremsen, läßt sich auch ihre Energie ermitteln.

Abb. 5.10.1
Zählrohr für Neutronenstrahlung (vereinfachte Schnittzeichnung)

6 Strahleneinwirkungen auf lebende Zellen

6.1 Aufbau einer Zelle

Grundbausteine aller Lebewesen sind Zellen. Es sind in der Regel sehr kleine Gebilde, die man mit bloßem Auge nicht erkennen kann. Die Körperzellen des Menschen haben Durchmesser zwischen 0,01 mm und 0,1 mm. Sie sind also mindestens 100 000mal größer als ein Atom. Insgesamt enthält ein menschlicher Körper rund 30 Billionen Zellen, davon sind 25 Billionen rote Blutkörperchen (Erythrozyten) [42, S. 58].

Trotz vielfältiger Unterschiede in Aufbau und Funktion der Zellen lassen sie sich mit demselben Schema beschreiben. Es ist in Abb. 6.1.1 dargestellt.

Abb. 6.1.1
Aufbau einer Zelle

Die Zellmembran grenzt die Zelle nach außen hin ab. Sie ist aber für bestimmte Stoffe durchlässig. Dadurch können Stoffe zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen aufgenommen und sog. Verbrennungsprodukte aus dem Innern ausgeschieden werden.
Das Zellplasma besitzt eine komplizierte Struktur. In ihm laufen vielfältige Vorgänge ab, die zur Aufrechterhaltung des Zellebens notwendig sind (Erneuerung bestimmter Zellbestandteile, Erzeugung von Energie, Wachstum, Vermehrung). Die Regelung der chemischen Prozesse wird von bestimmten Enzymen (Biokatalysatoren) übernommen.
Der Zellkern enthält die Chromosomen, in denen die Informationen über Aufbau und Funktionen der Zellen gespeichert sind. Die Chromosomenzahl ist bei jedem Lebewesen konstant (Tabelle 6.1.1).

Lebewesen	Anzahl der Chromosomen
Spulwurm	2
Erbse	14
Walderdbeere	14
Kaninchen	44
Mensch	46
Menschenaffe	48
Kartoffel	48
Hund	78
Neunauge	174

Tabelle 6.1.1
Chromosomenzahl einiger Lebewesen [80, S. 86 u. 138]

Die Lebensdauer einer Zelle ist begrenzt. Damit es in einem Organismus nicht zur Abnahme des Zellbestandes kommt, müssen fortlaufend Zellen nachgebildet werden. Es werden jedoch nicht alle Zellen des menschlichen Körpers erneuert, so z.B. nicht die Nervenzellen und einige Arten von Muskelzellen. Bei Organen mit erhöhter Abnutzung (z. B. Haut, Darmtrakt, Blutkörperchen) sind die Erneuerungsraten aber erstaunlich hoch. Tabelle 6.1.2 gibt dazu einige Beispiele.

System	Produktionsrate in	
	10^9 Zellen / d	10^{14} Zellen / 70a
Haut	0,7	0,18
Magen-Darm	56	14,31
Erythrozyten (rote Blutkörperchen)	200	51,10
Lymphozyten (Art weißer Blutkörperchen)	20	5,11

Tabelle 6.1.2
Erneuerungsraten menschlicher Zellen [36, S. 327]

6.2 Erbträger DNA

Die Zellen eines Organismus sind sehr stark spezialisiert. Die Chromosomen einer Zelle enthalten aber nicht nur die Informationen für diese speziellen Funktionen, sondern alle Informationen, die zur Aufrechterhaltung der Lebensfunktionen eines Organismus erforderlich sind. Wie erreicht wird, daß jede Zelle nur das für sie passende aus dem Informationsspeicher abliest, ist noch nicht genau erforscht.

Die Chromosomen sind Träger der Gene (beim Menschen geschätzt $3 \cdot 10^6$ / Zelle), diese wiederum bestehen aus Molekülen, die man unter dem Namen Desoxyribonukleinsäure (deutsch abgekürzt DNS, englisch abgekürzt DNA) zusammenfaßt. Sie enthalten letztlich die verschlüsselten Informationen [60, S. 382].

Die DNA enthält drei verschiedene Grundbausteine: den

Zucker Desoxyribonukleinsäure, vier unterschiedliche organische Basen und Phosphorsäure. Sie sind zu einem langen Kettenmolekül verknüpft, das einer Strickleiter ähnelt. In Wirklichkeit ist diese Strickleiter noch zusätzlich schraubenförmig verdreht (Abb. 6.2.1).

Immer zwei bestimmte Basen bilden eine Sprosse dieser Strickleiter: Adenin-Thymin oder Guanin-Cytosin. Beim Menschen folgen etwa 200 Basenpaare aufeinander. Die Information wird durch die Aufeinanderfolge der Basenpaare festgelegt, so wie bei der Schrift erst eine sinnvolle Reihenfolge von Buchstaben eine Wortinformation ergibt. Drei Basenpaare bilden die kleinste Verschlüsselungseinheit (Codon). 100 bis 300 hintereinander liegende Codons ergeben ein Gen [13, S. 54; 5, S. 38].

Gesunde Zellen sind in der Lage, im richtigen Augenblick den richtigen Abschnitt der DNA zu lesen und dadurch die erforderlichen biochemischen Reaktionen auszulösen. Wird ein Gen aktiviert, wird der Aufbau einer Aminosäurekette gesteuert, indem das dafür zuständige Codon abgelesen wird. Außerhalb des Zellkerns wird sie mit anderen Aminosäuren zu einem Enzym zusammengesetzt. Es kann dann in der Zelle selbst wirken oder in ein anderes Organ transportiert werden. Das Enzym wirkt wie ein Katalysator.

Die beiden miteinander verbundenen Basen verhalten sich wie Positiv und Negativ zueinander. Durch die Basenfolge des einen Strangs ist also immer die Basenfolge des anderen Strangs festgelegt.

Abb. 6.2.1
DNA-Aufbau in vereinfachter Darstellung

6.3 Zellteilungen

Bei der Befruchtung verschmelzen Ei- und Samenzelle miteinander, und die Chromosomen gelangen in einen gemeinsamen Zellkern. Damit es von Generation zu Generation nicht zu einer Verdoppelung der Chromosomenzahl kommt, besitzen die Keimzellen nur den einfachen, die Körperzellen aber den doppelten Chromosomensatz. Bei der Entstehung der Fortpflanzungszellen muß also der Chromosomensatz der Körperzellen halbiert werden (Abb. 6.3.1).

Abb. 6.3.1
Entstehung von Fortpflanzungszellen aus Körperzellen

Bei der Vermehrung von Körperzellen durch Zellteilung vollzieht sich auch eine Teilung der Chromosomen im Kern. Dabei spalten sich in den Chromosomen die Doppelstränge der DNA der Länge nach, indem die Basenpaare aufgetrennt werden. Kurz hinter der Trennstelle bildet jede halbe DNA wieder das komplementäre Gegenstück, indem die erforderlichen Bausteine im Zellplasma gebildet werden. Zum Schluß sind zwei identische DNA-Stränge vorhanden (Chromatiden). Sie wandern in die beiden neuen Zellen (Abb. 6.3.2).

Abb. 6.3.2
Befruchtung und nachfolgende Zellteilung in vereinfachter Darstellung

Bei der Selbstverdoppelung einer DNA sowie durch eine Reihe äußerer Einflüsse (z. B. chemische Substanzen, energiereiche Strahlung, Temperaturschock, Viren) können Schäden auftreten, die zu einer Veränderung der Erbinformationen führen. Sie wird Mutation genannt. Vollzieht sie sich in einer Körperzelle, spricht man von somatischer Mutation (Soma = Körper). Bei den Keimzellen ergibt sich eine Keimzellenmutation.

Man unterscheidet drei Mutationsarten: Gen- oder Punktmutation, Chromosomenmutation und Genommutation.

Punktmutation: Veränderungen in einem kleinen Bereich des DNA-Doppelstrangs. Wird z. B. die Folge der Basenpaare von G G A auf G A G umgestellt, ist der Code für die Entstehung einer anderen Aminosäure entstanden. Ein Enzym, in das diese veränderte Aminosäure eingebaut wird, hat dann unter Umständen veränderte biochemische Eigenschaften.

Bei einer Chromosomenmutation bricht ein Chromosom in zwei oder mehrere Teile auseinander. Dabei können Teile verloren gehen, getrennt bleiben, fehlerhaft zusammenwachsen oder sich an andere Chromosomen anlagern.

Von einer Genommutation spricht man, wenn sich die Chromosomenzahl ändert. So ist z.B. beim Down-Syndrom (Mongolismus) das Chromosom Nr. 21 nicht zweifach, sondern dreifach vorhanden.

6.4 Die strahlenbiologische Reaktionskette

Treffen ionisierende Strahlen auf einen Organismus (z. B. den Menschen), treten in den einzelnen Zellen physikalische und u.U. in der Folge chemische und biologische Effekte auf (Abb. 6.4.1).

Von den vielen Wechselwirkungen ionisierender Strahlen mit Materie sind letztlich nur die Ionisation und die Anregung von Bedeutung. Sie führen zu Veränderungen in den Atomhüllen, die allein die Bindung zwischen den Atomen eines Moleküls gewährleisten. Bei der Ionisation wird ein Elektron aus der Atomhülle abgetrennt, bei der Anregung in der Hülle verschoben (auf ein höheres Energieniveau gehoben).

Beide Effekte sind jedoch nicht endgültig. So kann die Ionisation durch Aufnahme eines freien Elektrons wieder rückgängig gemacht werden (Rekombination), das „verschobene" Elektron wieder seinen ursprünglichen Platz einnehmen.

Findet keine Rückbildung des physikalischen Primäreffektes statt, befindet sich die Elektronenhülle in einem veränderten bzw. instabilen Zustand.

Hat ein Strahlungsteilchen oder Strahlungsquant ein die chemische Bindung vermittelndes Elektron entfernt oder „verschoben", zerbricht das Molekül (Abb. 6.4.1).

Die entstandenen Bruchstücke reagieren nun chemisch anders als die Ursprungsmoleküle.

Gammaquant

Ein Gammaquant spaltet aus einem Wassermolekül ein Elektron ab (Photoeffekt).

Besitzt das Elektron genügend Energie, kann es aus einem organischen Molekül der Zelle ein Elektron herausschlagen, das an der Bindung beteiligt ist. Das Molekül zerbricht.

Abb. 6.4.1
Beispiel für eine direkte Strahlenwirkung (zur Vereinfachung an einer kurzen Kohlenwasserstoffkette aufgezeigt) [60, S. 356]

Das gleiche gilt für neue Verbindungen, die aus den Bruchstücken entstehen können. Sind diese Verbindungen toxisch, wird der Schaden noch verstärkt.

So kann z. B. Wasser, aus dem eine Zelle zu etwa 80% besteht, durch ionisierende Strahlen in Wasserstoffperoxid (H_2O_2) umgewandelt werden. Es ist bereits in schwacher Konzentration ein Zellgift.

Die veränderten oder neu entstandenen Moleküle bzw. Molekülstrukturen, deren biochemische Funktionsfähigkeit gestört oder gänzlich verloren gegangen ist, können repariert oder über den Stoffwechsel aus der Zelle entfernt werden. So werden z.B. Einzelstrangbrüche bei der DNA (Desoxyribonukleinsäure, Träger der genetischen Information) sehr erfolgreich behoben.

Die physikalischen Primäreffekte und die daraus folgenden chemischen Sekundäreffekte können schließlich zu einem biologischen Bestrahlungseffekt führen: die Zelle zeigt ein verändertes biologisches Verhalten oder ist nicht mehr funktionsfähig. Das führt jedoch nicht in jedem Fall dazu, daß der Schaden nach außen erkennbar wird.

Der menschliche Körper besitzt – wie alle anderen Lebewesen auch – die Fähigkeit, geschädigte oder nicht mehr funktionsfähige Zellen zu erkennen und mit Hilfe des Immunsystems zu bekämpfen und abzubauen. Der biologische Bestrahlungseffekt bleibt dann ohne gesundheitliche Konsequenz für den betreffenden Menschen.

Versagt das Abwehr- bzw. Reparatursystem oder wird es überfordert, kommt es zu einem Strahlenschaden. Er kann sofort oder nach einer längeren Zeit offenbar werden.

Grundsätzlich gilt, daß der Zellkern empfindlicher auf ionisierende Strahlen reagiert als das Zellplasma. Das ist auch verständlich, denn der Kern enthält die makromolekularen Informationsspeicher (DNA), die die vielfältigen Zellfunktionen steuern und regeln.

Einen biologischen Bestrahlungseffekt stellt man deshalb auch bevorzugt an Zellen fest, die sich zum Zeitpunkt der Bestrahlung zu teilen beginnen oder in der Teilung befinden. Die Reparaturmechanismen sind dann nur noch ungenügend wirksam.
Eine hohe Zellteilungsrate findet sich z.B. im Embryo, bei der Produktion roter Blutkörperchen oder bei den Schleimhautzellen im Magen-Darm-Trakt.

Man unterscheidet zwischen somatischen und genetischen Schäden. Somatische Schäden (Körperschäden) treten nur beim bestrahlten Individuum, genetische Schäden (Erbschäden) bei den Nachkommen auf. Davon sind aber nicht nur die direkten Nachkommen, sondern auch spätere Generationen betroffen.

Äußere Bestrahlung
Innere Bestrahlung
Physikalische Phase
Chemische Phase
Biochem. Phase
Biologische Phase
Ionisation und Anregung von Atomen und Molekülen
Rekombination oder
Radiolyse des Wassers, Bildung von Peroxiden
Veränderung von Aminosäuren und Enzymen
Zerbrechen von Makromolekülen, DNA-Schaden, Chromosomenbrüche
Reparatur des Schadens oder
Somatische Schäden
Genetische Schäden
Zelltod
Zelle
Keine Absorption, biologisch unwirksam
Schäden bei dem bestrahlten Individuum (Frühschäden, Spätschäden)
Schäden bei den Nachkommen
Tod des Organismus

Abb. 6.4.2
Die physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge in einer Zelle nach Strahleneinwirkung

6.5 Somatische und genetische Schäden

Bei den Schäden, die ionisierende Strahlen an Organismen hervorrufen, unterscheidet man zwischen somatischen und genetischen Schäden. Die somatischen Schäden unterteilt man in Früh- und Spätschäden, letztere noch einmal in maligne (bösartig wuchernde) und nichtmaligne (nicht bösartig wuchernde) Spätschäden (Abb. 6.5.1).

Abb. 6.5.1
Einteilung der Strahlenschäden

Somatische Schäden treten nur bei dem bestrahlten Individuum auf. Dabei kann auch eine Veränderung der Erbträger in den bestrahlten Zellen die Ursache sein.

Damit Frühschäden nach Stunden oder spätestens nach einigen Wochen nach der Bestrahlung auftreten bzw. medizinisch nachweisbar sind, muß der Organismus von einer Mindestmenge an Strahlung getroffen werden. Diese Schwellendosis für den Menschen liegt bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung zwischen 200 und 300 mSv (20 000 bis 30 000 mrem). Es zeigen sich z. B. kurzzeitige Veränderungen des Blutbildes, die aber nur medizinisch feststellbar sind.

Je größer von da ab die Strahlungsmenge wird, desto gravierender sind auch diese Strahlenschäden. Frühschäden beim Menschen sind z. B. außer Veränderungen des Blutbildes, Unwohlsein, Erbrechen bis hin zu Entzündungen der Schleimhäute und Fieber. Eine einmalige Ganzkörperbestrahlung mit einer Dosis von 7 000 mSv (700 000 mrem) gilt als tödlich, wenn keine Therapiemaßnahmen ergriffen werden (Abb. 6.5.2 u. 6.5.3).

Somatische Spätschäden treten erst nach Jahren oder Jahrzehnten auf. Dabei hat sich der Schaden in den Zellen unmittelbar nach der Bestrahlung ergeben. Die am Gesamtorganismus beobachtbaren Krankheitssymptome treten aber sehr viel später in Erscheinung.

Bei nicht bösartigen Spätschäden (z. B. Sterilität, Trübung der Augenlinse) kann davon ausgegangen werden, daß eine Mindestmenge an Strahlung auf den Organismus einwirken muß (Schwellendosis, Kurve C in Abb. 6.5.2). Dabei ist es jedoch möglich, daß wiederholte Einzelbestrahlungen mit Dosen unterhalb des Schwellenwertes zu Spätschäden führen können.

Bei bösartigen Spätschäden (z. B. Leukämie) ist diese Mindestmenge an Strahlung sehr klein oder es gibt überhaupt keine Schwelle (Kurve A oder B in Abb. 6.5.2). Es würde dann bedeuten, daß auch einzelne Strahlungsteilchen oder Gammaquanten Krebs auslösen können, wenn z.B. die von der Strahlung getroffene Zelle bereits vorgeschädigt ist bzw. der Reparaturmechanismus und das Immunsystem des Körpers geschwächt sind. Mit steigender Strahlungsmenge nimmt aber nicht die Schwere der Erkrankung, sondern die Wahrscheinlichkeit zu erkranken, zu. Das ist aber weder experimentell nachweisbar noch durch statistische Erhebungen zu ermitteln. Es ergibt sich lediglich durch rückwärtige Verlängerungen der Dosis-Wirkung-Kurve für hohe Strahlendosen (Abb. 6.5.2).

Abb. 6.5.2
Dosis-Risiko-Beziehung für den Bereich höherer Strahlendosen und Extrapolation in den Bereich kleiner Strahlendosen.
A: lineare Extrapolation
B: linear-quadratische Extrapolation
C: Risikokurve mit Schwellenwert S

Bei genetischen Schäden treten Veränderungen an den Chromosomen der Keimzellen auf. Sie wirken sich erst bei den Nachkommen aus.

Auch bei genetischen Schäden ist eine Reparatur möglich oder es kann die nach einem falschen genetischen Code aufgebaute Zelle, das daraus entstandene Gewebe bzw. der nicht lebensfähige Embryo abgestoßen werden. Ein genetischer Schaden würde dann nicht an die nächste Generation weitergegeben.

Grundsätzlich sind Mutationen natürliche Ereignisse, die bei Menschen, Tieren und Pflanzen immer wieder vorkommen. Sie können spontan auftreten oder gezielt durch chemische bzw. physikalische Einflüsse herbeigeführt werden.

Daß auch ionisierende Strahlen Mutationen auslösen, ist erstmals 1927 nachgewiesen worden. Die durch die natürliche Strahleneinwirkung hervorgerufenen Mutationen sind zahlenmäßig so gering, daß sie aus den zeitlichen Schwankungen der natürlichen Mutationsraten nicht hervortreten .

Erst eine Keimdrüsendosis von etwa 10 mSv = 1 000 mrem einer locker ionisierenden Strahlung (Beta- oder Gammastrahlung) führt unter 1 Million Neugeborenen zu der Spontanrate 0,06 % genetischer Schadensfälle [45, S. 197].

3 Stunden Flug pro Jahr in 10 km Höhe
0,01 mSv/a (1 mrem/a)

Grenzwert für die Ganzkörperbelastung der Bevölkerung durch radioaktive Ableitungen aus kerntechnischen Anlagen (jeweils über Luftpfad und Wasserpfad)
0,3 mSv/a (30 mrem/a)

Mittlere Strahlenbelastung durch medizinische Strahlenanwendung, Bundesrepublik Deutschland (effektive Dosis)
1,5 mSv/a (150 mrem/a)

Mittlere natürliche Strahlenbelastung in der Bundesrepublik Deutschland (effektive Dosis)
2,4 mSv/a (240 mrem/a)

Zusätzliche natürliche Strahlendosis beim Wohnen in Beton- oder Granitbauten
max. 3 mSv/a (300 mrem/a)

50 mSv/a (5 000 mrem/a)
Grenzwert der effektiven Dosis für beruflich strahlenexponierte Personen in der Bundesrepublik Deutschland

200 mSv/a (20 000 mrem/a)
Maximale natürliche Strahlenbelastung im Monazitbezirk Brasiliens

ca. 250 mSv (25 000 mrem)
Erste klinisch faßbare Bestrahlungseffekte bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung (Schwellendosis)

ca. 1000 mSv (100 000 mrem)
Vorübergehende Strahlenkrankheit bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung („Strahlenkater")

ca. 4000 mSv (400 000 mrem)
Schwere Strahlenkrankheit bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung, 50 % Todesfälle bei fehlenden medizinischen Therapiemaßnahmen

ca. 7000 mSv (700 000 mrem)
Tödliche Dosis bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung und fehlenden medizinischen Therapiemaßnahmen

1 rem ≙ 0,01 Sv **1 mrem ≙ 0,01 mSv**

Abb. 6.5.3
Beispiele für Äquivalentdosen (Die Angaben zu den Werten von 250 mSv bis 7 000 mSv beschreiben somatische Strahlenfrühschäden.)
[81, S. 10 und 13, S. 41]

6.6 Faktorenabhängigkeit der Strahlenwirkungen

Somatische und in geringerem Umfang auch genetische Strahlenwirkungen sind von verschiedenen Bedingungen abhängig. Sie sind durch die Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin seit langem bekannt (Abb. 6.6.1).

Abb. 6.6.1
Die biologische Strahlenwirkung ist von mehreren Faktoren abhängig

Im folgenden werden diese Faktoren im wesentlichen für die somatischen Schäden beschrieben [45, S. 184ff].

Strahlenart
Wie bereits bei 5.3 erwähnt, haben die einzelnen Strahlenarten unterschiedliche biologische Wirkungen (bei gleichen Energiedosen). Dabei ist von entscheidender Bedeutung, daß sie eine unterschiedliche Ionisationsdichte hervorrufen. Je größer sie ist, desto größer sind auch die biologischen Wirkungen. Das wird durch den Qualitätsfaktor berücksichtigt.

Dosis
Grundsätzlich gilt, daß die Strahlenwirkungen mit der Dosis zunehmen. Bei somatischen Frühschäden gibt es dafür einen Schwellenwert. Bei bösartigen Spätschäden sowie bei genetischen Schäden wird kein Schwellenwert angenommen. Im ungünstigsten Fall können schon kleinste Dosen zu entsprechenden Effekten führen.

Zeitliche Dosisverteilung
Es gilt allgemein, daß die Wirkung einer Dosis desto geringer ist, je größer die zeitlichen Abstände zwischen den Teildosen sind.

– Bei einer Aufteilung der Dosen entstehen pro Zeit weniger Molekülbruchstücke. Da sie dann in der Zelle in geringerer Dichte vorliegen, sind auch die Reaktionsmöglichkeiten zwischen ihnen kleiner.

– Durch Aufteilung einer Gesamtdosis können Schädigungen zwischenzeitlich ganz oder teilweise beseitigt werden. (Bei Strahlenspätschäden können sich u. U. auch mehrere über längere Zeiträume verteilte Einzeldosen aufsummieren.)

Räumliche Dosisverteilung
Aus der medizinischen Strahlentherapie ist bekannt, daß Dosen von 30 000 bis 50 000 mSv, die zur Bestrahlung eines Tumors eingesetzt werden, im allgemeinen den Gesamtorganismus nicht in Gefahr bringen. Als Ganzkörperdosen würden diese Werte aber immer zum Tode führen. Man muß also immer zwischen Ganzkörper- und Teilkörperdosen bzw. Organdosen unterscheiden.

Andererseits gibt es Organe, die schon bei einer Bestrahlung mit schwachen Dosen den Gesamtorganismus u. U. beträchtlich schädigen können. Das ist von der Strahlenempfindlichkeit des betreffenden Organs abhängig.

Abb. 6.6.2
Rangfolge der Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe / Gewebe / Stoffe im Menschen [60, S. 349; 45, S. 188]

Relative Strahlenempfindlichkeit

Einzelne Organe oder Gewebe des Menschen sind gegenüber ionisierenden Strahlen unterschiedlich empfindlich (Abb. 6.6.2). Sie haben eines gemeinsam: in ihnen finden hohe Zahlen von Zellteilungen statt. Die Strahlung wirkt dann im Augenblick der Zellteilung ein und kann den Teilungsvorgang verzögern bzw. mehr oder weniger lange blockieren. Zusätzlich können die Zellen ihre Teilungsfähigkeit verlieren. Insgesamt wird also das Gleichgewicht zwischen Zellverlust und Zellerneuerung gestört.

Wegen der hohen Zellteilungstätigkeit ist auch ein wachsender Embryo im Mutterleib besonders gefährdet. Dabei stellen die ersten vier Wochen das gefährlichste Stadium dar.

Milieufaktoren

Einzelne Organe des Menschen oder der gesamte Organismus können z.B. durch die Art der Ernährung, den Mißbrauch von Genußmitteln, die Anwendung bestimmter Arzneimittel sowie andere Faktoren für Strahlen besonders sensibilisiert werden.

So sind z.B. mit Sauerstoff gut versorgte Zellen besonders strahlenempfindlich. Einen ähnlichen Einfluß haben Geschlechtshormone: männliche Personen sind strahlenempfindlicher als weibliche.

6.7 Strahlenempfindlichkeit von Lebewesen

Lebewesen zeigen gegenüber ionisierenden Strahlen eine unterschiedliche Empfindlichkeit. Diese Unterschiede können mit Hilfe der mittleren Letaldosis (letal = tödlich) beschrieben werden. Sie gibt die Dosis an, die bei einer Röntgenganzkörperbestrahlung für 50 % der Individuen einer großen Zahl von Lebewesen innerhalb von 30 Tagen zum Tode führt (somatischer Frühschaden).

Die mittlere Letaldosis $LD_{50/30}$ liegt für Menschen zwischen 3 Sv und 5 Sv (angenommene Werte, nicht durch Experimente gewonnen). Einige Lebewesen zeigen eine größere, andere aber eine deutlich geringere Strahlenempfindlichkeit. Es fällt auf, daß die Fledermaus als Säugetier eine mehr als 30fache Strahlendosis empfangen kann als der Mensch. Überraschend ist auch die große Widerstandsfähigkeit von Wespen, die in der Nähe von Amöben und des Tabak-Mosaik-Virus liegt.

Bei Pflanzen (hier nicht aufgeführt) hat man in Experimenten festgestellt, daß die Empfindlichkeit gegenüber ionisierenden Strahlen vom Gehalt der Zellkerne an DNA abhängt. Es wird vermutet, daß die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit bei Tieren auch damit zusammenhängt.

Abb. 6.7.1
Strahlenempfindlichkeit verschiedener Lebewesen [60, S. 349]

7 Radionuklide im menschlichen Körper

7.1 Der Standardmensch und seine Verzehrgewohnheiten

Mit der Nahrung und der Atemluft nimmt der Mensch Radionuklide auf. Sie führen zu einer Eigenstrahlung des menschlichen Körpers.

Die Stoffwechselvorgänge der Menschen sind von ihren Erbanlagen, den Verzehr- und Lebensgewohnheiten, den örtlichen Gegebenheiten sowie ihrem Geschlecht und Alter abhängig. Soll die Strahlendosis abgeschätzt werden, die durch aufgenommene Radionuklide entsteht, benötigt man eine einheitliche biologische Grundlage. Es ist deshalb der Standardmensch definiert worden. Bei ihm legt man ein Alter von 20 bis 30 Jahren, eine Gesamtlebensdauer von 70 Jahren = 25500 Tagen, ein Körpergewicht von 70 kg, eine Körperoberfläche von 1,8 m^2, eine Körpergröße von 170 cm sowie bestimmte Organgewichte, Stoffwechselvorgänge und Verzehrgewohnheiten zugrunde (Abb. 7.1.1 und Tabellen 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3 und 7.1.4) [55, S. 62ff].

Bei den Verzehrgewohnheiten können sich für das einzelne Individuum u. U. gravierende Abweichungen von den errechneten Mittelwerten ergeben. So ist z. B. bei Kleinkindern der Verzehr von Milch im Mittel dreimal höher als bei Erwachsenen. Bei Menschen, die von der Teichwirtschaft leben, kann der Verzehr von Süßwasserfischen bis zu 30mal höher liegen. Neben den Mittelwerten für die Bevölkerung allgemein sind deshalb immer auch die Mittelwerte für die kritische Bevölkerungsgruppe zu bedenken.

Abb. 7.1.1
Grunddaten des Standardmenschen

Organgewichte		
Organ	Masse g	% des Körpergewichts
Gesamtkörper	70 000	100
Muskeln	30 000	43
Haut und subkutanes Gewebe	6 100	8,7
Skelett ohne Knochenmark	7 000	10
Blut	5 400	7,7
Leber	1 700	2,4
Nieren (2)	300	0,43
Schilddrüse	20	0,029
Lungen (2)	1 000	1,4
Magen-Darm-Kanal	2 000	2,9
Herz	300	0,43
rotes Knochenmark	1 500	2,1

Tabelle 7.1.1
Organgewichte des Standardmenschen

Luftumsatz	
Atemluft insgesamt	20 m^3 / d
während 8 Std. Arbeit	10 m^3 / d
während der restlichen 16 Std.	10 m^3 / d
Gesamtoberfläche des Atmungstraktes	70 m^2
Austauschfläche der Lunge	50 m^2
Fläche der oberen Luftwege (Luftröhre, Bronchien)	20 m^2
Wasserumsatz	
Wasseraufnahme insgesamt	2,5 l / d
mit der Nahrung	1,0 l / d
als Flüssigkeit	1,2 l / d
Oxidationswasser	0,3 l / d
Wasserausscheidung insgesamt	2,5 l / d
durch Urin	1,4 l / d
durch Schweiß	0,6 l / d
durch Atmung	0,3 l / d
durch Kot	0,2 l / d
Gesamtwassergehalt	43,0 l

Tabelle 7.1.2
Luft- und Wasserumsatz beim Standardmenschen

In Tabelle 7.1.3 ist angegeben, wieviel Nahrungsmittel ein Erwachsener im Mittel pro Jahr verzehrt. Die Werte können sich im Laufe der Zeit ändern, wenn sich die Verzehrgewohnheiten der Menschen ändern. Die angegebenen Nahrungsmittelgruppen weisen gleichzeitig auf wichtige Belastungspfade hin. Denn mit den Nahrungsmitteln werden immer auch natürliche und künstlich erzeugte Radionuklide mit aufgenommen.

Nahrungsmittelgruppe	mittlerer Jahresverbrauch in kg	mittlerer Jahresverbrauch für die kritische Bevölkerungsgruppe in kg
Süßwasserfisch	1,3	20
Milch- und Milchprodukte	110	330
Fleisch u. Fleischwaren	75	150
Pflanzliche Produkte	231	500
davon fallen auf		
• Getreide und Getreideprodukte	96	190
• Obst und Obstsaft	27	100
• Wurzelgemüse	87	170
• Blattgemüse	21	40

Tabelle 7.1.3
Jahresverbrauch an Nahrungsmitteln

Der Verzehr von Nahrungsmitteln stellt im Prinzip eine Aufnahme verschiedener Elemente dar. Dabei kann der Organismus nicht zwischen radioaktiven und nicht radioaktiven Isotopen eines Elements unterscheiden. Wieviel von einzelnen Elementen von einem Erwachsenen pro Tag aufgenommen wird, zeigt Tabelle 7.1.4.

Beispielrechnungen:

(a)
Wieviel g Kalium befindet sich in der Muskulatur eines Standardmenschen?
In 1 g Muskulatur befinden sich $2{,}9 \cdot 10^{-3}$ g Kalium.
In $3 \cdot 10^4$ g Muskulatur befinden sich
$3 \cdot 10^4 \cdot 2{,}9 \cdot 10^{-3}\,g = 87$ g Kalium.

(b)
Wieviel g Kalium befinden sich im Gesamtkörper eines Standardmenschen?
In 1 g Gesamtkörper befinden sich $2 \cdot 10^{-3}$ g Kalium.
In $7 \cdot 10^4$ g Gesamtkörper befinden sich
$7 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-3}\,g = 140$ g Kalium.

Element	tägliche Aufnahme mit der Nahrung in g	Organ	Organmasse in g	Natürl. Konzentration in $\frac{\text{g Element}}{\text{g Organ}}$
Kohlenstoff	400	Gesamtkörper Fett Knochen	70 000 10 000 7 000	0,18 0,75 0,13
Wasserstoff	350	Gesamtkörper	70 000	0,01
Natrium	4	Gesamtkörper	70 000	$1{,}5 \cdot 10^{-3}$
Phosphor	1,4	Gesamtkörper Knochen	70 000 7 000	0,01 0,05
Kalium	3	Gesamtkörper Muskulatur	70 000 30 000	$2 \cdot 10^{-3}$ $2{,}9 \cdot 10^{-3}$
Calcium	1	Gesamtkörper Knochen	70 000 7 000	0,015 0,145
Eisen	0,027	Gesamtkörper Blut	70 000 5 400	$5{,}7 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-4}$
Strontium	10^{-3}	Gesamtkörper Knochen	70 000 7 000	$2 \cdot 10^{-6}$ $1{,}5 \cdot 10^{-5}$
Iod	$2 \cdot 10^{-4}$	Gesamtkörper Schilddrüse	70 000 20	$5{,}7 \cdot 10^{-7}$ $4 \cdot 10^{-4}$
Cäsium		Gesamtkörper Muskulatur	70 000 30 000	$1{,}4 \cdot 10^{-10}$ $3 \cdot 10^{-7}$
Radium	$5{,}5 \cdot 10^{-12}$	Gesamtkörper Knochen	70 000 7 000	$1{,}4 \cdot 10^{-15}$ $1{,}7 \cdot 10^{-14}$
Thorium		Gesamtkörper Knochen	70 000 7 000	$4{,}6 \cdot 10^{-10}$ $2{,}3 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 7.1.4
Tägl. Aufnahme einiger Elemente mit der Nahrung und ihre natürliche Konzentration in einzelnen Organen [55, S. 62]

7.2 Nahrungsketten und Belastungspfade

Radioaktive Stoffe aus der Luft, dem Wasser und dem Boden gelangen direkt mit der Atemluft oder dem Trinkwasser in den menschlichen Körper oder indirekt über eine der Nahrungsketten (Abb. 7.2.1).

Bei den Nahrungsketten lassen sich folgende Glieder unterscheiden:

- Ablagerung radioaktiver Stoffe auf den Pflanzen oder dem Boden (soweit es sich um Radionuklide aus der Luft handelt).
- Aufnahme radioaktiver Stoffe über die Blätter oder die Wurzeln in die Pflanzen.
- Verzehr der Pflanzen durch Tier oder Mensch.
- Verarbeitung der Tiere oder tierischer Produkte zu Nahrungsmitteln.

Die Herkunft der Nahrungs- und Genußmittel, des Wassers und der Luft sowie die Lebens- und Ernährungsgewohnheiten des Menschen bestimmen u.a. die Menge der vom Körper aufgenommenen radioaktiven Stoffe.
So kann die Verwendung von Brunnen- oder Quellwasser mit erhöhtem Radiumgehalt, der bevorzugte Aufenthalt in schlecht belüfteten Räumen eines Natursteinhauses oder der verstärkte Verzehr von Nahrungsmitteln mit einem erhöhten Gehalt an Radionukliden den Radioaktivitätsgehalt des menschlichen Körpers erhöhen.

Es ist nicht zu verhindern, daß natürliche Radionuklide in den menschlichen Körper gelangen, da die gesamte Erdmaterie (einschließlich Pflanzen und Tiere) von Natur aus schwach radioaktiv ist.

Unter der natürlichen Strahlung hat sich das Leben auf der Erde entwickelt.

Abb. 7.2.1
Belastungspfade für radioaktive Stoffe

7.3 Anreicherung von Radionukliden in Nahrungsketten

In den Gliedern der Nahrungsketten können sich Radionuklide anreichern. Sie treten dann in erhöhten Konzentrationen auf. Es ist darauf zurückzuführen, daß ein Organismus nicht für alle Elemente einen Regelmechanismus besitzt, um bestimmte Konzentrationen einzuhalten.

Beim Menschen gehören z.B. die Elemente Kalium, Calcium und Iod zu den sog. geregelten Elementen. Es bedeutet, daß ein gesunder Organismus bei ausreichendem Nahrungsangebot ihre Konzentration im Körper auf einem bestimmten Wert hält. Im Standardmenschen sind es für Calcium 1050 g, Kalium 140 g und für Iod 30 mg. Bei erhöhter Zufuhr dieser Elemente mit der Nahrung wird der nicht benötigte Anteil mit den Ausscheidungsprodukten wieder abgegeben.

Die Elemente Strontium und Cäsium zählen beim Menschen zu den nicht geregelten Elementen. Je größer das Angebot dieser Elemente in der Nahrung ist, desto mehr wird auch resorbiert und verbleibt eine mehr oder minder lange Zeit im Körper. Es kann dabei zu erheblichen Konzentrationen kommen. Von einem bestimmten Sättigungswert an bildet sich ein Gleichgewichtszustand zwischen Aufnahme und Ausscheidung.

Einen Anreicherungsvorgang im Nahrungssystem eines Süßwassersees zeigt Abb. 7.3.1 Auffallend dabei ist die sehr hohe Anreicherung des Sr−90 in den Knochen der Wirbeltiere.

Es kann angenommen werden, daß sich entsprechend hohe Konzentrationen auch beim Menschen ergeben würden. Experimentell gewonnene Werte liegen für den Menschen jedoch nicht vor.

Abb. 7.3.1
Anreicherung von Sr−90 im Nahrungssystem eines Süßwassersees [21, S. 128]

7.4 Die natürlichen Radionuklide in Nahrungsmitteln

Im Boden, im Wasser und in der Luft unserer Biosphäre sind natürliche Radionuklide vorhanden. Durch Stoffwechselvorgänge gelangen sie in pflanzliche und tierische Organismen und somit in die Nahrungsmittel des Menschen.

Der größte Anteil der natürlichen Aktivität in Nahrungsmitteln rührt vom Kalium−40 her. Radium−226, Thorium−228, Blei−210 und Polonium−210 sowie Kohlenstoff−14 und Wasserstoff−3 ergeben demgegenüber – von Ausnahmen abgesehen – eine relativ geringe spezifische Aktivität (Abb. 7.4.1).

Kalium (und damit auch Kalium−40) ist praktisch auf der gesamten Erdoberfläche und in den Gewässern (Seen, Flüsse, Meere) vorhanden. Die Pflanzen nehmen Kalium mit den Wurzeln aus dem Boden oder dem Wasser auf und speichern es in den Stengeln, Ästen, Blättern, Blüten, Früchten usw. Mit der pflanzlichen Nahrung gelangt das Kalium−40 dann auch in die Tiere und die Menschen.

Der Gehalt unserer Nahrungsmittel an Kalium schwankt sehr stark, weil die verschiedenen Pflanzen- und Tierarten für ihr Wachstum unterschiedlich viel Kalium benötigen. Dadurch ist auch die Konzentration von Kalium−40 in den einzelnen Nahrungsmitteln unterschiedlich. Dasselbe gilt auch für andere Radionuklide (Abb. 7.4.2 und Tabellen 7.4.1 und 7.4.2).

Die in Abb. 7.4.1 wiedergegebenen Werte stellen nur eine grobe Abschätzung für die Konzentration einiger Radionuklide in den Nahrungsmitteln dar.

37 K–40
0,37 H–3
0,037 Ra–226
0,037 Th–228
0,037 Pb–210
0,037 Po–210
0,037 C–14

Abb. 7.4.1
Abschätzung der spezifischen Aktivität einiger natürlicher Radionuklide in Nahrungsmitteln [in Bq / kg] [3, S. 54]

Nahrungsmittel	Spezifische Aktivität des Ra−226 in Bq / kg Frischgewicht
Margarine	0,004
Milch	0,01
Kartoffeln	0,03
Äpfel	0,03
Schweinefleisch	0,04
Mehl	0,1
Eier	0,12
Karotten	0,14
Fisch	0,19
Erdnüsse	0,67
Paranüsse	8−132

Tabelle 7.4.1
Ra−226 in Nahrungsmitteln [3, S. 55]

75 Hühnereier
130 Äpfel
160 Kuhmilch
185 Rotbarsch
290 Roggenvollkornbrot
385 Schweinefleisch
445 Kartoffeln
700 Pflaumen
1300 weiße Bohnen
1920 Kakaopulver
Milch
Kakao

Abb. 7.4.2
Kaliumgehalt von Nahrungsmitteln (mg / 100 g eßbarer Teil) [72]

Für die Konzentrationsschwankungen lassen sich drei Gründe anführen:

• Die pflanzlichen und tierischen Organismen, aus denen die Nahrungsmittel gewonnen werden, verfügen über unterschiedliche physiologische Mechanismen und speichern deshalb unterschiedlich viele Radionuklide in ihren Zellen.

• Die Konzentration an natürlichen Radionukliden ist an den Orten der Nahrungsmittelgewinnung unterschiedlich. So haben Kartoffeln normalerweise eine mittlere Konzentration an Ra–226 von etwa

0,03 Bq / kg.

Kartoffeln aus Gebieten mit erhöhter natürlicher Radioaktivität (z.B. Monazitgebiet in Kerala / Indien) haben dagegen einen Gehalt von Ra–226 von etwa

0,74 Bq / kg.

• Manche Radionuklide verhalten sich biochemisch ähnlich wie jene Elemente, die für den betreffenden Organismus physiologisch wichtig sind. So zeigt Rubidium eine ähnliche (nicht gleiche) chemische Reaktionsfähigkeit wie Natrium und Kalium (Alkalimetalle); Radium verhält sich ähnlich wie die beiden verwandten Elemente Barium und Calcium (Erdalkalimetalle). Diese Ähnlichkeit im Verhalten kann dazu führen, daß bei verstärkter Aufnahme von Calcium (z. B. intensiverer Knochenbaustoffwechsel in der Wachstumsphase von Tieren) auch vermehrt Radium eingebaut wird.

Die Aufnahme von Radium durch Pflanzen ist in der Regel gering. Eine Ausnahme bildet der Paranußbaum. Er reichert verstärkt Barium an, womit gleichzeitig eine extrem hohe Aufnahme von Radium verbunden ist.

Uran, Radium und Thorium werden von den Pflanzen ausschließlich aus dem Boden aufgenommen. Blei–210 und Polonium–210 entstehen z. T. in der Atmosphäre als Folgeprodukte des Radon. Diese Radionuklide können dann nicht nur aus dem Boden aufgenommen, sondern zu einem erheblichen Teil auch durch die Blätter der Pflanzen aus der Luft „herausgefiltert“ werden. Bei langsam wachsenden Pflanzen (z. B. Flechten in den Tundren) geht eine solche Filterung über lange Zeit vor sich. Pb–210 und Po–210 können in ihnen angereichert auftreten und Ausgangspunkt für eine Nahrungskette mit erhöhtem Gehalt an Pb–210 und Po–210 sein. Sie reicht vom Primärproduzenten Pflanze über den Primärkonsumenten Rentier bis zu den Sekundärkonsumenten Bär oder Mensch (Abb. 7.4.3).

In den Zähnen von Lappen, die Rentiere züchten, ist eine doppelt so hohe Aktivität an Pb–210 und Po–210 nachgewiesen worden wie bei einer Population, die nicht in arktischen Gebieten lebt. Die Konzentration dieser Radionuklide im Blut und in der Plazenta ergab sogar den 2– bis 12fachen Wert, verglichen mit den Werten bei der westlichen, nichtarktischen Bevölkerung [3, S. 58ff.].

Nahrungsmittel	Spezifische Aktivität in Bq / kg Frischgewicht	
	Pb–210	Po–210
Schweinefleisch	0,37	0,37
Schweine	3,7	3,7
Rindfleisch	0,74	0,74
Rinderniere	1,48	7,4
Rinderleber	2,59	1,85
Fisch	1,48	1,48
Eier	18,5	18,5
Rentierfleisch	0,12	11,8
Rentierleber	44,4	144
Rentierleber (Winter)	–	222
Elchfleisch	0,1	6,7
Elchleber	3,11	48,1
Bärenfleisch	0,09	0,7
Bärenleber	9,62	27,38

Tabelle 7.4.2
Pb–210- und Po–210- Aktivitäten von Nahrungsmitteln [3, S. 58f.]

Abb. 7.4.3
Teil einer Nahrungskette in den Tundren (Zerfallsstufen unvollständig dargestellt)

7.5 Aufnahmewege und Speicherorgane

Natürliche radioaktive Stoffe können auf verschiedenen Wegen in den menschlichen Körper gelangen (Abb. 7.5.1)

Aufnahme
- in die Luftwege und Lungenräume (Inhalation),
- in den Verdauungskanal (Ingestion),
- durch die intakte Haut (perkutane Resorption),
- durch Wunden oder über andere natürliche oder künstliche Körperöffnungen.

In der Regel ist nur die Aufnahme radioaktiver Stoffe über die Lunge und den Verdauungskanal von Bedeutung, weil auf diesen Wegen die größten Substanzmengen und damit auch die größten Mengen an Radionukliden in das Körperinnere gelangen.

Von Uran werden mit der Nahrung im Mittel etwa 1 µg / d, von Radium–226 etwa 1–2 pg / d aufgenommen. Für Kalium gilt eine Substanzmenge von 3 g / d als Mittelwert; darin sind 0,35 mg K–40 enthalten.

Ein Teil der inkorporierten Radionuklide wird vom Körper resorbiert, d.h. durch die Zellschichten hindurch in den Blutkreislauf bzw. das Lymphsystem aufgenommen. Dadurch können sie in alle Teile des Körpers gelangen. Der nicht resorbierte Teil der radioaktiven Stoffe wird über Nieren und Darm sowie z.T. auch über die Lunge wieder ausgeschieden.

Für jedes Radionuklid gibt es eine Hauptablagerungsstätte, an der ein besonders großer Prozentsatz des resorbierten Materials gespeichert wird (Speicherorgan) (Tabelle 7.5.1) [52, S. 112; 35, S. 125].

Radionuklid	Speicherorgan
H–3	Körpergewebe / Körperwasser
C–14	Fett
K–40	Muskulatur / Ganzkörper
Sr–90	Knochen
I–131	Schilddrüse
Cs–137	Muskulatur / Ganzkörper
Ra–226	Knochen
U–238	Nieren / Knochen

Tabelle 7.5.1
Speicherorgane für einige Radionuklide

Die unterschiedliche Verteilung der resorbierten radioaktiven Stoffe im menschlichen Körper führt zu unterschiedlichen Strahlenbelastungen der einzelnen Organe.

Inhalation: Einatmung

Ingestion: Aufnahme der Nahrung

perkutan: durch die Haut hindurch

Resorption: Aufnahme von Stoffen in den Blutkreislauf, das Lymphsystem oder andere Körperflüssigkeiten

Depot: Hauptablagerungsstätte, Speicherorgan

Exkret: Ausscheidungsprodukt

Abb. 7.5.1
Die wesentlichen Transportwege für radioaktive Stoffe im menschlichen Körper

Die Abb. 7.5.2, 7.5.3, 7.5.4 und 7.5.5 zeigen für die natürlichen Nuklide der Elemente Kalium, Iod, Cäsium und Strontium die tägliche Aufnahme mit der Nahrung, die Resorption durch den Körper, die Speicherung in einem bestimmten Organ und die Ausscheidung über Darm bzw. Nieren. Treten in Nahrungsmitteln und Trinkwasser zusätzlich künstlich erzeugte Radionuklide auf, verändern sich die genannten Aufnahmewerte. Die angegebenen biologischen Halbwertszeiten sind ein Maß für die Ausscheidungsgeschwindigkeit eines resorbierten Radionuklids (vgl. 7.6).

Kalium

Aufnahme im wesentlichen mit der Nahrung und dem Trinkwasser, täglich etwa 3 g.

Speicherung in den aktiven Zellen bzw. der Muskulatur, Gehalt beim Standardmenschen etwa 140 g.

Kalium ist lebensnotwendig für die Herz-, Muskel-, und Nerventätigkeit.

Ausscheiden vorwiegend über die Nieren.

Biologische Halbwertszeit 58 d.

Abb. 7.5.2
Kalium im menschlichen Körper [55, S. 62]

Iod

Aufnahme im wesentlichen mit der Nahrung und dem Trinkwasser ①, täglich etwa 0,2 mg.

Nach etwa einer Stunde ist bereits mehr als 90 % des verschluckten Iods aus dem Magen-Darm-Trakt ② aufgenommen.

Speicherung in der Schilddrüse ③, Iodgehalt etwa 30 mg.

Ausscheiden über die Nieren ④.

Biologische Halbwertszeit 40 bis 140 d.

Abb. 7.5.3
Iod im menschlichen Körper [35, S. 134; 55, S. 62]

Strontium

Aufnahme im wesentlichen mit der Nahrung und dem Trinkwasser, täglich etwa 1 mg.

Etwa 20 % der verschluckten Menge werden aus dem Magen-Darm-Trakt aufgenommen.

Bevorzugte Speicherung in den Knochen (98 %).

Ausscheidung über Darm und Nieren.

Biologische Halbwertszeit etwa 50 d.

Abb. 7.5.4
Strontium im menschlichen Körper [55, S. 62; 35, S. 137ff.]

Cäsium

Aufnahme von geringsten Mengen mit der Nahrung und dem Trinkwasser.

Nach 24 h ist das verschluckte Cäsium fast vollständig vom Körper aufgenommen.

Speicherung des Cäsium im wesentlichen in der Muskulatur bzw. im Gesamtkörper, Gehalt etwa 10 mg.

Ausscheiden vorwiegend über die Nieren.

Biologische Halbwertszeit für den Gesamtkörper 70 d, für die Muskulatur 140 d.

Abb. 7.5.5
Cäsium im menschlichen Körper [55, S. 142ff.]

7.6 Die Verweilzeit der Radionuklide im Körper

Die vom Körper resorbierten und in bestimmten Organen gespeicherten Radionuklide werden im wesentlichen mit dem Urin sowie dem Kot wieder ausgeschieden. Eine Ausscheidung über die Lunge und die Haut spielt praktisch nur bei radioaktiven Edelgasen bzw. tritiumhaltigem Wasser eine Rolle. Bei stillenden Müttern werden bestimmte Radionuklide auch über die Muttermilch ausgeschieden.

Die Verweilzeit von Radionukliden im Skelett und in der Leber ist im allgemeinen hoch, während sie aus der Niere und aus weichem Gewebe meist rasch ausgeschieden werden. Bei einigen Radionukliden ist es möglich, die Verweilzeit im Körper durch therapeutische Maßnahmen zu verkürzen.

Bei der Ausscheidung sowohl der radioaktiven als auch der stabilen Nuklide werden etwa in gleichen Zeitabschnitten gleiche Bruchteile ausgeschieden. Aufgrund dieser Erfahrung kann man eine biologische Halbwertszeit definieren. Sie gibt an, nach welcher Zeit die Hälfte eines vom Körper resorbierten radioaktiven oder stabilen Nuklids wieder ausgeschieden ist.

Den Ausscheidungsvorgang für Cäsium–137 zeigt die Abb. 7.6.1.

1

z.B. einmalige Aufnahme von etwa 0,6 ng*) Cs–137

2000 Bq Cs–137

Speicherung des Cäsium vor allem in der Muskulatur / Ganzkörper

*) 1 ng = 10^{-9} g

2

Nach 70 Tagen (biol. HWZ für den Ganzkörper)

1000 Bq Cs–137

Über die Nieren ausgeschiedenes Cs–137:
0,3 ng ≙ 1000 Bq

3

Nach 140 Tagen

500 Bq Cs–137

Insgesamt ausgeschiedenes Cs–137:

	0,3 ng	≙	1000 Bq
+	0,15 ng	≙	500 Bq
	0,45 ng	≙	1500 Bq

4

Nach 210 Tagen

250 Bq Cs–137

Insgesamt ausgeschiedenes Cs–137:

	0,3 ng	≙	1000 Bq
+	0,15 ng	≙	500 Bq
+	0,075 ng	≙	250 Bq
	0,525 ng	≙	1750 Bq

Abb. 7.6.1
Die biologische Halbwertszeit

Beispiele für biologische Halbwertszeiten:

Radionuklid	biologische Halbwertszeit
H-3	12 d
Sr-90	49 a
K-40	58 d
Cs-137	70 d (Ganzkörper)/140 d (Muskulatur)
Ra-226	44,9 a
U-nat	20 d
Th-232	24,8 a (Ganzkörper)/200 a (Knochen)
I-131	40 bis 140 d

Tabelle 7.6.1
Biologische Halbwertszeit einiger Radionuklide
[20, S. 245; 35, S. 121 ff.]

Die biologische Halbwertszeit eines Radionuklids kann für ein bestimmtes Organ und den gesamten Organismus unterschiedlich sein. Sie ist kein konstanter Wert, sondern u.a. abhängig vom Lebensalter und von den Ernährungsgewohnheiten.

Neben der Ausscheidung eines Radionuklids nimmt die Aktivität im Innern des menschlichen Körpers zusätzlich durch radioaktiven Zerfall ab.

Das wird im folgenden an den nicht wirklich existierenden Radionukliden X_1 und Y_1 deutlich gemacht.

Beispiel 1:

Radionuklid X_1 wandelt sich zu dem Nuklid X_2 um. Physikalische Halbwertszeit 5 d, biologische Halbwertszeit 60 d.

Beurteilung:
Noch ehe eine biologische Halbwertszeit von 60 Tagen abgelaufen ist, sind bereits 10 physikalische Halbwertszeiten vergangen. Dabei hat sich das Radionuklid zu mehr als 99,9% in das stabile Nuklid X_2 umgewandelt.
Zur Beurteilung der internen Strahlenbelastung des Menschen wäre in diesem Fall also nur die physikalische Halbwertszeit von Bedeutung.

Beispiel 2:

Radionuklid Y_1 wandelt sich zu dem Nuklid Y_2 um. Physikalische Halbwertszeit 50 a, biologische Halbwertszeit 10 d.

Beurteilung:
Noch ehe ein Bruchteil der physikalischen Halbwertszeit abgelaufen ist, sind bereits mehr als 10 biologische Halbwertszeiten vergangen und das Radionuklid praktisch vollständig aus dem Körper ausgeschieden. Von Bedeutung wäre also in diesem Fall nur die biologische Halbwertszeit.

Das Zusammenwirken der physikalischen Halbwertszeit T_p und der biologischen Halbwertszeit T_B ergibt die effektive Halbwertszeit T_{eff}. Sie gibt an, in welchem Maße die Aktivität eines Radionuklids durch radioaktiven Zerfall und biologische Ausscheidungsvorgänge im Körper abnimmt.

Die effektive Halbwertszeit läßt sich nach der Gleichung

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_B}$$

$$T_{eff} = \frac{T_p \cdot T_B}{T_p + T_B}$$

berechnen.

Die effektive Halbwertszeit ist von entscheidender Bedeutung für die Strahleneinwirkung der in den Organismus aufgenommenen Radionuklide.

Zwischen T_p und T_B können große Unterschiede auftreten. In solchen Fällen entspricht T_{eff} nahezu dem kleineren von beiden Werten.

Beispiel 1: H-3

$T_p = 12{,}323\ a = 4498\ d$ $\quad T_B = 12\ d$ $\quad T_{eff} = 11{,}97\ d$

Beispiel 2: Ra-226

$T_p = 5{,}84 \cdot 10^5\ d$ $\quad T_B = 1{,}64 \cdot 10^4\ d$ $\quad T_{eff} = 1{,}6 \cdot 10^4\ d$

Aufgrund der physikalischen und biologischen Faktoren läßt sich die relative Gefährlichkeit der natürlichen Radionuklide klassifizieren. Dafür wird der Begriff Radiotoxizität verwendet. Darunter versteht man die Toxizität, die auf den ionisierenden Strahlen des inkorporierten Radionuklids und seiner Folgeprodukte beruht.

Eine sehr hohe Radiotoxizität besitzt Ra-226 (und Folgeprodukte), da es ein langlebiger Alphastrahler ist (HWZ 1600 a), sich in den Knochen ablagert und – verglichen mit der Lebensdauer des Menschen – relativ langsam wieder ausgeschieden wird.

Radiotoxizität	Radionuklide	Freigrenzen in Bq
sehr hoch	Ra-226, Pu-239	$5 \cdot 10^3$
hoch	I-131, Cs-134	$5 \cdot 10^4$
mittel	Cs-137, Ba-140	$5 \cdot 10^5$
niedrig	U-nat, Tc-99 m	$5 \cdot 10^6$

Tabelle 7.6.2
Freigrenzen für einige Radionuklide

Die in der Bundesrepublik Deutschland gültige Strahlenschutzverordnung legt sogenannte Freigrenzen fest. Es sind Aktivitätswerte, bis zu denen im beruflichen Bereich der Umgang mit Radionukliden genehmigungs- und anzeigefrei ist.

7.7 Die natürliche Aktivität des Standardmenschen

Natürliche Radionuklide, die mit der Atemluft, dem Trinkwasser und der Nahrung in den menschlichen Körper gelangen, werden von ihm z.T. resorbiert und über eine bestimmte Zeitspanne hinweg im Körper gespeichert (Verweilzeit). Sie rufen die natürliche Radioaktivität des menschlichen Körpers hervor [60, S. 303].

Radionuklid	Aktivität in Bq
K–40	4500
C–14	3800
Rb–87	650
Pb–210, Bi–210, Po–210	60
kurzlebige Zerfallsprodukte des Rn–220	30
H–3	25
Be–7	25
kurzlebige Zerfallsprodukte des Rn–222	15
sonstige	7
Summe	9112

Tabelle 7.7.1
Die wichtigsten natürlichen Radionuklide im Menschen

Bei den natürlichen Radionukliden im menschlichen Körper handelt es sich im wesentlichen um K–40, C–14 sowie einige Folgeprodukte aus der Uran-Radium- und der Thorium-Zerfallsreihe. Die Tabelle 7.7.1 gibt die im Standardmenschen vorhandenen natürlichen Radionuklide und ihre Aktivität an.

Die Gesamtaktivität des menschlichen Körpers (Standardmensch) beträgt also etwa 9000 Bq. Es bedeutet, daß in 1 Sekunde etwa 9000 Kernumwandlungen stattfinden und dabei 9000 Strahlungsteilchen oder Energiequanten ausgesandt werden. Am Tag sind es über 700 Millionen. Eine größere Eigenaktivität findet man nur bei den Bewohnern Lapplands sowie der Monazitgebiete Indiens und Brasiliens.

Da sich die resorbierten Radionuklide an unterschiedlichen Stellen im Körper ablagern, ist die Aktivität nicht gleichmäßig im Körper verteilt. Für einen Vergleich der Aktivität des Menschen mit der von Nahrungsmitteln wird in Abb. 7.7.1 jedoch eine gleichmäßige Verteilung angenommen.

Abb. 7.7.1
Natürliche Radioaktivität im Menschen und in Nahrungsmitteln
[3, S. 54ff.]

7.8 Bestimmung der Äquivalentdosis aus der inkorporierten Aktivität

Ionisierende Strahlen können auf zweierlei Weise auf den Menschen einwirken. Es ist eine Bestrahlung von außen möglich (externe Strahlenexposition) und der Körper kann von innen bestrahlt werden (interne Strahlenexposition), wenn Radionuklide mit der Nahrung und der Atemluft in den Körper gelangen.

Um berechnen zu können, welche Strahlendosis ein Mensch erhält, wenn eine bestimmte Menge radioaktiver Stoffe in seinen Körper gelangt, hat man die Dosisfaktoren festgelegt. Sie erlauben es, z.B. aus der spezifischen Aktivität von Nahrungsmitteln die zu erwartende Strahlenbelastung in mSv (oder mrem) zu berechnen.
In Tabelle 7.8.1 sind die Dosisfaktoren für einige Radionuklide zusammengestellt [51, S. 56].

Radionuklid	Organ	Kind (1 Jahr alt)	Erwachsener
K–40	effektive Dosis	$3{,}9 \cdot 10^{-8}$	$5{,}0 \cdot 10^{-9}$
Sr–90	Knochenoberfläche effektive Dosis	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$ $1{,}1 \cdot 10^{-7}$	$3{,}9 \cdot 10^{-7}$ $3{,}5 \cdot 10^{-8}$
I–131	Schilddrüse effektive Dosis	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$ $1{,}1 \cdot 10^{-7}$	$4{,}3 \cdot 10^{-7}$ $1{,}3 \cdot 10^{-8}$
I–131 (Inhalation)	Schilddrüse effektive Dosis	$2{,}2 \cdot 10^{-6}$ $6{,}6 \cdot 10^{-8}$	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$ $8{,}1 \cdot 10^{-9}$
Cs–134	effektive Dosis	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	$2{,}0 \cdot 10^{-8}$
Cs–137	effektive Dosis	$9{,}3 \cdot 10^{-9}$	$1{,}4 \cdot 10^{-8}$
Ra–226	Knochenoberfläche effektive Dosis	$4{,}6 \cdot 10^{-5}$ $2{,}6 \cdot 10^{-6}$	$6{,}8 \cdot 10^{-6}$ $3{,}6 \cdot 10^{-7}$
Po–210	Nieren effektive Dosis	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$ $3{,}3 \cdot 10^{-6}$	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$ $5{,}1 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 7.8.1
Dosisfaktoren *DF* in Sv / Bq für die Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung

Die Dosisfaktoren sind von dem jeweiligen Radionuklid, der chemischen Verbindung des Radionuklids, dem Aufnahmeweg, dem Speicherorgan, dem Alter der Person sowie der Zusammensetzung der Nahrung und den Verzehrgewohnheiten abhängig. Die in Tabelle 7.8.1 angegebenen Werte sind deshalb als Durchschnittswerte aufzufassen.

Beispiel 1:

Ein Kind trinkt 1 l Milch, dessen I–131-Aktivität 50 Bq beträgt. Wie hoch ist die zusätzliche Strahlenbelastung der Schilddrüse und wie hoch ist die effektive Dosis?

Schilddrüsendosis:

$$DF = \frac{3{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{Sv}}{\text{Bq}} = \frac{50 \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{Sv}}{50\,\text{Bq}} = \frac{1{,}75 \cdot 10^{-1}\,\text{mSv}}{50\,\text{Bq}}$$

$$= 0{,}175\,\text{mSv} / 50\,\text{Bq} = 17{,}5\,\text{mrem} / 50\,\text{Bq}$$

Effektive Dosis:

$$DF = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-7}\,\text{Sv}}{\text{Bq}} = \frac{50 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-7}\,\text{Sv}}{50\,\text{Bq}} = \frac{5{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{mSv}}{50\,\text{Bq}}$$

$$= 0{,}0055\,\text{mSv} / 50\,\text{Bq} = 0{,}55\,\text{mrem} / 50\,\text{Bq}$$

Beispiel 2:

Ein Erwachsener ißt 100 g Paranüsse mit einer spezifischen Aktivität an Ra–226 von 100 Bq / kg. Wie hoch ist die Belastung seiner Knochen?

$$DF = \frac{6{,}8 \cdot 10^{-6}\text{Sv}}{\text{Bq}} = \frac{6{,}8 \cdot 10^{-3}\,\text{mSv}}{\text{Bq}}$$

$$= \frac{10 \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-3}\,\text{mSv}}{10\,\text{Bq}} = \frac{6{,}8 \cdot 10^{-2}\,\text{mSv}}{10\,\text{Bq}}$$

$$\approx 0{,}07\,\text{mSv} / 10\,\text{Bq} = 7\,\text{mrem} / 10\,\text{Bq}$$

Abb. 7.8.1
Veranschaulichung des Dosisfaktors für Cs–137

8 Natürliche Strahlenquellen

Die ionisierende Strahlung, die in der Natur vorkommt, läßt sich auf vier verschiedene Quellen zurückführen:

- Aus dem Weltall trifft eine Teilchenstrahlung und energiereiche Photonenstrahlung auf die Erde (kosmische Strahlung).
- In der Erdatmosphäre werden durch die kosmische Strahlung ständig Radionuklide mit relativ kurzer Halbwertszeit neu gebildet.
- Auf der Erde kommen natürliche Radionuklide mit großer Halbwertszeit vor, die sich nur durch einen Zerfallsschritt in inaktive Nuklide umwandeln.
- Natürliche Radionuklide mit langer Halbwertszeit wandeln sich in mehreren Stufen zu inaktiven Nukliden um. In diesen Zerfallsreihen entstehen auch Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten.

8.1 Kosmische Strahlung und die Erzeugung neuer Radionuklide

Von der Sonne und anderen Sternen trifft eine energiereiche Teilchenstrahlung auf die Lufthülle unserer Erde. Diese Strahlung besteht im wesentlichen aus Protonen, also aus Wasserstoffkernen (Tabelle 8.1.1).

Teilchenart	Anteil
Protonen	93 %
Heliumkerne (Alphateilchen)	6,3 %
schwere Kerne	< 0,7 %

Tabelle 8.1.1
Zusammensetzung der kosmischen Primärstrahlung

Die Energie kosmischer Protonen kann bis zu mehr als 10^{14} MeV betragen [37, S. 41]. Beim Zusammenprall mit den Molekülen der Lufthülle werden Atomkerne zertrümmert. Dabei entstehen neue Kerne und Teilchen, die weiterfliegen und z. T. weitere Kerne zertrümmern, bis ihre ursprüngliche Energie aufgebraucht ist. Am Erdboden ist nur die Strahlung zu beobachten, die durch vielfältige Sekundärprozesse entsteht (Abb. 8.1.1).

Die bei den Kernprozessen neu entstandenen Protonen verlieren durch Stöße weitere Energie und wandeln sich letztlich durch Einfang eines Elektrons zu Wasserstoffatomen um. Die Neutronen mit einer Halbwertszeit von 10,6 min wandeln sich in Protonen um oder können sich an andere Atomkerne anlagern, wodurch diese in der Regel radioaktiv werden. Die wichtigsten Radionuklide, die durch die kosmische Strahlung erzeugt werden, sind H–3, Be–7, C–14 und Na–22.

Abb. 8.1.1
Komponenten der kosmischen Sekundärstrahlung

Entstehung von C–14:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}p \qquad \text{(Entstehung)}$$

$$^{14}_{6}C \xrightarrow[\text{5730 a}]{\text{HWZ}} ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}e \qquad \text{(rad. Zerfall)}$$

Die natürliche globale C–14-Aktivität beträgt $8{,}5 \cdot 10^{18}$ Bq. In Kohlenstoff, der aus Bäumen gewonnen wurde, liegt sie bei 227 Bq / kg [37, S. 59].

Entstehung von H–3:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{12}_{6}C \qquad \text{(Entstehung)}$$

oder

$$^{16}_{8}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{14}_{1}N \qquad \text{(Entstehung)}$$

$$^{3}_{1}H \xrightarrow[\text{12,323 a}]{\text{HWZ}} ^{3}_{2}He + ^{0}_{-1}e \qquad \text{(rad. Zerfall)}$$

Die gesamte Aktivität des auf natürlichem Wege erzeugten Tritium liegt bei $1{,}3 \cdot 10^{18}$ Bq. Es ist zu etwa 99% im Wasser gebunden. Vor den Kernwaffenversuchen betrug die Tritiumaktivität des Meereswassers etwa 100 Bq / m^3, in kontinentalen Oberflächengewässern zwischen 200 und 900 Bq / m^3 [37, S. 58].

Elektronen und Gammaquanten besitzen nur ein geringes Durchdringungsvermögen. Sie werden bereits durch die Luft teilweise absorbiert. Die praktisch völlige Abschirmung kann durch 15 cm Blei erreicht werden.

Mesonen sind Elementarteilchen, deren Masse zwischen der von Elektronen und Protonen liegt. In Meereshöhe beträgt die kosmische Strahlung zu etwa 90% aus Mesonen.

Sie haben eine außerordentlich kurze Lebensdauer in der Größenordnung von Sekundenbruchteilen und zerfallen – je nach ihrer Ladung – in ein Elektron oder Positron sowie zwei Neutrinos.

Die Intensität der Mesonenstrahlung wird durch eine 1 m dicke Bleiplatte erst auf die Hälfte herabgesetzt. Mesonen sind deshalb noch in Bergwerken und auf dem Grund tiefer Seen nachgewiesen worden [43, S. 205; 14, S. 75 u. 50].

Die Wechselwirkungen zwischen Neutrinos und Materie sind außerordentlich schwach. So wird z.B. von 1 Million Neutrinos, die durch die Erdkugel fliegen, nur eines absorbiert. Sie stellen deshalb auch keine Gefahr für Organismen dar.

8.2 Natürliche Radionuklide ohne und mit Zerfallsreihen

In der Natur existieren 20 Radionuklide mit extrem langer Halbwertszeit, die sich nur durch einen einzigen Zerfallsschritt in inaktive Nuklide umwandeln. Man kann annehmen, daß es sich dabei um Radionuklide aus der Entstehungszeit der irdischen Materie handelt. Durch die lange Halbwertszeit ist ihre Aktivität seit ihrer Entstehung noch nicht vollständig abgeklungen. Anders ausgedrückt: bei der Entstehung der Erdmaterie war die natürliche Radioaktivität um ein Vielfaches höher als heute.

Unter diesen Radionukliden ist Kalium–40 von besonderer Bedeutung, da es in der Biosphäre eine hohe spezifische Aktivität besitzt und in gleichbleibender geringer Konzentration im menschlichen Körper vorkommt.

Die in der Natur vorkommenden Kaliumisotope bestehen zu 93,2581 % aus K–39, zu 6,7302 % aus K–41 u. zu 0,0117 % aus dem radioaktiven K–40. Es zerfällt unter Aussenden eines Betateilchens zu Ca–40 oder durch K–Einfang zu Ar–40 (Abb. 8.2.1). Da das K–40 mit dem angegebenen Anteil in jeder Kaliumverbindung vertreten ist, sind auch alle Kaliumverbindungen radioaktiv.

Weitere natürliche Radionuklide ohne Zerfallsreihen sind z.B. Rb–87, Se–82, Te–123, Sm–147 oder Pt–190.

Abb. 8.2.1
Zerfallsschema für K–40

Es gibt außerdem natürliche Radionuklide mit sehr langen Halbwertszeiten, die sich in mehreren Stufen in inaktive Nuklide umwandeln. Dabei werden ständig Radionuklide mit z. T. sehr kurzen Halbwertszeiten neu gebildet.

In der Natur kommen drei Zerfallsreihen vor (Tabelle 8.2.1 und Abb. 8.2.2 u. 8.2.3).

Zerfallsreihe	Beginn	Ende
Thorium-Reihe	$^{232}_{90}Th$	$^{208}_{82}Pb$
Uran-Actinum-Reihe	$^{235}_{92}U$	$^{207}_{82}Pb$
Uran-Radium-Reihe	$^{238}_{92}U$	$^{206}_{82}Pb$

Tabelle 8.2.1
Natürliche Radioaktivitätszerfallsreihen

In den drei Zerfallsreihen durchlaufen die Radionuklide die Kernladungszahl 86. Es treten also verschiedene Radonisotope auf. Radon ist ein Edelgas, das teilweise aus dem Erdboden und dem Mauerwerk von Gebäuden austritt und dann in der Luft weiter zerfällt.

In den früheren Zeiten der Erdgeschichte existierte eine weitere Zerfallsreihe, die Plutonium-Neptunium-Reihe. Das Ausgangsglied war $^{241}_{94}Pu$, das Endglied $^{209}_{83}Bi$.

Diese Zerfallsreihe ist „ausgestorben", weil das langlebigste Glied dieser Reihe ($^{237}_{93}Np$) eine – verglichen mit dem Alter der Erde – geringe Halbwertszeit von $2{,}14 \cdot 10^6$ a hat. Nachdem aber die Transurane künstlich hergestellt worden sind, existiert auch diese Zerfallsreihe wieder.

Gleichfalls ausgestorben sind die Muttersubstanzen der heute noch in der Natur vorkommenden Radioaktivitäts-Zerfallsreihen, da ihre Halbwertszeiten klein gegenüber dem Alter der Erde sind.

Thorium–Reihe   Uran–Actinium–Reihe

Abb. 8.2.2
Th- und U–Ac-Zerfallsreihe

Uran–Radium–Reihe   Plutonium–Neptunium–Reihe

Abb. 8.2.3
U–Ra- und Pu–Np-Zerfallsreihe

8.3 Natürliche Radionuklide in Boden, Wasser und Luft

Die natürlichen Radionuklide kommen im Erdboden, im Wasser und in der Luft in unterschiedlichen Konzentrationen vor. Durch Verwitterungsprozesse oder auch meteorologische Faktoren kann sich die Konzentration kurzzeitig oder über längere Zeiträume hinweg ändern.

Der Gehalt des Erdbodens an natürlichen Radionukliden wird auch durch den Mineraldünger verändert, den man in der Landwirtschaft einsetzt.

Tabelle 8.3.1 gibt die spezifische Aktivität für einige Bodenarten an. Dabei fällt auf, daß durch die Bezeichnung der Bodenart nicht gleichzeitig auch der Gehalt an natürlichen Radionukliden festliegt (siehe Basalt).

Bodenart	Herkunft	Spezifische Aktivität in Bq / kg		
		Ra–226	Th–232	K–40
Fränkischer Schiefer	Hof	29,6	55,5	999
Kalkstein	Pfalz	< 7,4	11,1	< 37
Granit	Italien	37	62,9	925
Basalt	Hessen	29,6	22,2	444
Basalt	Pfalz	44,4	48,1	222
Basalt	Prag	55,5	33,3	444
Rohphosphat	Marokko	1776	22,2	703
Rheinsand	Speyer	18,5	11,1	407
Bimsstein	Neuwieder Becken	74	70,3	1036

Tabelle 8.3.1
Radionuklide in verschiedenen Bodenarten [3, S. 73]

Bei den natürlichen Radioaktivitätszerfallsreihen tritt auch das radioaktive Edelgas Radon auf. Es kann durch Erdspalten und Bodenkapillaren in die Atmosphäre gelangen. Dieser Vorgang ist von geologischen und meteorologischen Bedingungen abhängig. So wird z.B. durch Schnee oder Wasser das Austreten des Radon aus dem Erdboden größtenteils verhindert. Die drei Radonisotope haben unterschiedliche Halbwertszeiten:

Isotop	Halbwertszeit
Rn–219	3,96 s
Rn–220	55,6 s
Rn–222	3,825 d

Tabelle 8.3.2
Radonisotope aus den natürlichen Radioaktivitätszerfallsreihen

Bei Rn–222 reicht die Halbwertszeit von 3,8 d aus, daß es nach dem Ausströmen aus der Erde oder dem Mauerwerk in den unteren Luftschichten verteilt wird. Man schätzt, daß von dem entstandenen Rn–222 im Mittel 15% in den Luftraum gelangen. Dort zerfallen die Radionuklide weiter (Abb. 8.3.1) [3, S. 51].

Die Konzentration von Rn–222 und Rn–220 beträgt in der bodennahen Luft im Mittel 14 Bq / m^3. Über meeresnahen Luftschichten ist die Radonkonzentration geringer, da der Radiumgehalt des Meeres geringer ist als der des Erdbodens [3, S. 52; 53, S. 41; 60, S. 18 u. 298].

Die äußere Strahleneinwirkung auf den Menschen durch die in der Luft vorhandenen natürlichen radioaktiven Stoffe braucht nur für den menschlichen Atemtrakt untersucht zu werden, weil sie in allen anderen Organen außerordentlich niedrig ist.

Abb. 8.3.1
Entstehung des Rn–222 und seiner Folgeprodukte in bodennaher Luft

Im Wasser sind seit jeher natürliche Radionuklide enthalten. Zusätzlich werden Radionuklide aus dem Boden gelöst und in Flüsse, Seen und das Meer geschwemmt.

Die in der Atmosphäre entstehenden Folgeprodukte des Radon sowie durch die kosmische Strahlung erzeugte Radionuklide gelangen durch Sedimentation, Konvektion, Diffusion oder mit dem Niederschlag zur Erde bzw. in die Gewässer.

Im Meerwasser wird die Radioaktivität im wesentlichen durch das K–40 verursacht. Grund- und Quellwasser enthalten als wichtigste Radionuklide Radon und seine Folgeprodukte.
Manche Heilquellen besitzen einen besonders hohen Gehalt an natürlichen Radionukliden. Die spezifische Aktivität kann dann bis 37 000 Bq / l betragen. Dieser Wert tritt aber nur kurzfristig auf, weil das Radon sehr schnell aus dem Wasser entweicht [60, S. 301].

Wasser-vorkommen	Konzentration an natürlichen Radionukliden in Bq / l						
	H–3	Ra–226	Rn–222 und kurzlebige Folgeprodukte	K–40	U–238	Pb–210	Po–210
Meer	0,019–0,056	0,0015–0,0059	0,00074–0,033	12,21	0,037	0,00185	—
Flüsse, Seen	0,037–0,37	<0,00037–0,074	0,37–1,85	0,037–1,85	0,00056–0,037	0,0037–0,185	—
Grundwasser	0,037–0,37	<0,0037–0,37	3,7–370	0,0037–0,37	0,0011–0,185	0,00185	0,00037–0,00222
Regen	0,37–0,74	—	37–3700	0,0037–0,074	—	0,0074–0,185	0,0037–0,037
Trinkwasser	0,185	0,0037	0,37–3,7	0,185	0,00185	0,00074	0,00037

Tabelle 8.3.3
Natürliche Radionuklide in Wasser [3, S. 31 f.]

8.4 Die natürlichen Radionuklide in Baustoffen

Die von den Menschen verwendeten Baumaterialien enthalten ebenfalls radioaktive Stoffe. Ihre Konzentration schwankt in Abhängigkeit von der Baustoffgruppe und der Herkunft. Verallgemeinernd lassen sich über die wichtigsten Baumaterialien folgende relative Angaben machen:

Baustoff	Radioaktivitätsgehalt
Gips, Holz, Kunststoff	sehr niedrig
Kalkstein, Sandstein	niedrig
Ziegel, Beton	mittel
natürliches Gestein	hoch
Schlackenstein, Bimsstein	sehr hoch

Tabelle 8.4.1
Klassifizierung von Baustoffen nach dem Radioaktivitätsgehalt [3, S. 70ff.]

Die Wohnungen stellen eine Anhäufung von Erdmaterie dar. Je größer die Masse ist, die die Bewohner umgibt, desto mehr natürliche Radionuklide sind auch vorhanden und senden Strahlen aus.

Bei Gebäuden muß zusätzlich bedacht werden, daß beim radioaktiven Zerfall von Uran–238, Uran–235 und Thorium–232 in den Zerfallsreihen auch Isotope des Elements Radon auftreten.

Radon ist ein radioaktives Edelgas, das aus dem Erdboden und Gebäudewänden z.T. ausströmt und dann in der Luft weiter zerfällt (Abb. 8.4.1).

In Gebäuden mit undichten Kellerräumen (z. B. mit Naturstein- oder Naturbodenkeller) oder die nur ungenügend belüftet werden, kann sich dadurch in den Wohnräumen eine deutlich höhere Radonkonzentration ergeben als in Freiluft.

Im Freien beträgt die spezifische Aktivität der Luft im Mittel 14 Bq / m^3. In Wohnungen liegt der Wert im Mittel bei 50 Bq / m^3.

Das verwendete Baumaterial, die Bauweise und die in den Gebäuden stattfindende Ventilation sind dabei von Bedeutung.

Wenn es das Ziel ist, die Strahlenexposition der Bevölkerung so gering wie möglich zu halten und unnötige Belastungen zu vermeiden, muß auch die Strahlenintensität kontrolliert werden, die durch die Radioaktivität der Baustoffe verursacht wird.

Als Richtwerte für die Baustoffindustrie (Stand 1985) werden z. Z. für den Radium- und Thoriumgehalt folgende Grenzwerte diskutiert (Tab. 8.4.2) [76]:

spez. Aktivität in Bq / kg	Klassifizierung
bis 370	freie Verwendung
370 bis 925	Anzeigepflicht
über 925	Zulassungspflicht

Tabelle 8.4.2
Klassifizierung von Baustoffen nach ihrem Radioaktivitätsgehalt

Abb. 8.4.1
Eindringen des radioaktiven Edelgases Radon in Wohnräume

8.5 Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen

Die kosmische und die terrestrische Strahlung sind seit Entstehung der Erde vorhanden. Das Leben auf der Erde hat sich unter ihrer Einwirkung entwickelt.

Die natürliche Strahlenbelastung des Menschen kann in einzelnen Ländern bzw. Gebieten der Erde recht unterschiedlich sein.

Für Einwohner der Bundesrepublik Deutschland liegt die effektive Äquivalentdosis im Mittel bei 2,4 mSv / a (240 mrem / a). Kleinere Bevölkerungsgruppen sind mit höheren Dosen belastet [81, S. 10].

Bei der natürlichen Strahlenbelastung macht die äußere Bestrahlung des Menschen etwa ein Drittel, die innere Bestrahlung etwa zwei Drittel aus. Dabei liefert das eingeatmete Radon und seine Folgeprodukte den größten Beitrag (Abb. 8.5.1 und Tabelle 8.5.1).

Bestrahlung
von außen
von innen
0,8 mSv / a
= 80 mrem / a
1,6 mSv / a
= 160 mrem / a
2,4 mSv / a = 240 mrem / a

Abb. 8.5.1
Äußere und innere Strahleneinwirkung auf den Menschen [81, S. 10]

natürliche Strahlenquellen	mittlere effektive Dosisleistung in mSv / a		
	von außen	von innen	insgesamt
kosmische Strahlung	0,3	–	0,3
terrestrische Strahlung von außen	0,5	–	0,5
Inhalation von Radon in Wohnungen	–	1,3	1,3
Inkorporation natürlicher rad. Stoffe (im wesentlichen K–40)	–	0,3	0,3
Summe	0,8	1,6	2,4

Tabelle 8.5.1
Mittlere effektive Äquivalentdosisleistung beim Menschen durch natürliche Strahlenquellen [81, S. 10]

Wie Abb. 8.5.2 zeigt, ist die Lunge das am stärksten belastete Organ des Menschen. Dabei spielen neben dem Radon selbst vor allem die Folgeprodukte eine entscheidende Rolle. Es sind z.T. langlebige, alphastrahlende Metalle, die sich im Lungengewebe absetzen und dann zu hohen Ionisationsdichten führen.

Lungen
Keimdrüsen
Magen-Darmtrakt, Leber, Nieren
Knochenmark
1,1 mSv / a =110 mrem / a
1,2 mSv / a =120 mrem / a
1,6 mSv / a =160 mrem / a
12 mSv / a =1200 mrem/a

Abb. 8.5.2
Mittlere natürliche Strahlenbelastung für verschiedene Organe [37, S. 68]

Eine Verringerung der natürlichen Strahleneinwirkung auf den Menschen müßte also an dieser Stelle ansetzen: Verwendung von Baumaterialien mit einem geringeren Gehalt an Radionukliden der Uran- und Thoriumzerfallsreihen sowie Verbesserung der Belüftung der Wohnungen.

Kleinere Bevölkerungsgruppen erhalten höhere Strahlendosen als in Tabelle 8.5.1 angegeben.

Die natürliche Strahlenbelastung steigt mit der Höhe über dem Meeresspiegel. In 1000 m Höhe liegt sie bei 0,4 mSv / a, in 3000 m Höhe bei 1,1 mSv / a (Abb. 8.5.3).

Die Dosisleistung bei Flügen in großen Höhen muß gesondert betrachtet werden. Z. Zt. findet der Massenlufttransport in Höhen von 7 bis 12 km statt. Dadurch erhöht sich die durch kosmische Strahlung hervorgerufene Dosisleistung für die gesamte Bevölkerung um etwa 0,001 mSv / a (0,1 mrem / a) (Mittelwert). Für den einzelnen Fluggast ergeben sich von den Flugstunden abhängige höhere Werte.

Die Flugzeugbesatzungen werden bei angenommenen 600 Flugstunden im Jahr und einer Dosisleistung von 0,002 mSv / h (0,2 mrem / h) eine zusätzliche Jahresdosis von 1,2 mSv (120 mrem) erhalten. Nach den Festlegungen der Internationalen Strahlenschutzkommission wären die Flugzeugbesatzungen also nicht der Gruppe der beruflich strahlenexponierten Personen zuzurechnen (vgl. 12.1) [3, S. 130].

Bei Raumflügen treten noch höhere Dosen auf. In diesen Höhen fehlt die strahlenabschirmende Wirkung der Atmosphäre, außerdem durchfliegt das Raumschiff in etwa 20 km Höhe einen Strahlungsgürtel. Er entsteht durch Wechselwirkungen der kosmischen Primärteilchen mit den Molekülen der oberen Luftschichten (Abb. 8.5.4).

Eine zweite Ursache für eine deutlich höhere Strahlenbelastung kann der Gehalt des Erdbodens an natürlichen Radionukliden sein. Kleinere Bevölkerungsgruppen erhalten dadurch eine über 0,5 mSv (50 mrem) liegende Jahresdosis. Bei etwa 1% der Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland liegt sie bei 1 mSv / a (100 mrem / a).

Es gibt Gebiete der Erde, in denen die terrestrischen Strahlendosen weit über den höchsten Werten der Bundesrepublik Deutschland liegen. Dabei handelt es sich um Gebiete, in denen der Boden oder das Gestein eine hohe Konzentration an Thorium bzw. Uran und deren Folgeprodukten aufweist. Solche Gebiete finden sich in Brasilien, Indien, Iran und Frankreich. Grundsätzlich gehören auch die Uranerzlagerstätten dazu.

Gebiet	Dosisleistung in mSv / a	
	Mittelwert	Maximum
Frankreich / Granitbezirke	2,5	4
Brasilien / Atlantikküste	8	200
Indien / Monazitbezirk*	10	40
Iran	18	450

Tabelle 8.5.2 [37, S. 55]
Erhöhte Werte terrestrischer Strahlendosen
*Monazit ist ein radionuklidhaltiges Mineral (Phosphat Seltener Erden)

Extremwerte der terrestrischen Strahlenbelastung treten auch durch die verwendeten Baumaterialien auf. So kann z. B. bei Verwendung von Granit oder Schlackensteinen als Baumaterialien die zusätzliche Strahlendosis bis 2 mSv / a (200 mrem / a) betragen [37, S. 56].

Bei Nahrungsmitteln treten extreme Konzentrationen an natürlichen Radionukliden nur bei der Paranuß und der Rentierleber auf. Einer erhöhten Strahlenbelastung sind deshalb nur sehr kleine Bevölkerungsgruppen ausgesetzt, die sich von diesen Produkten bevorzugt ernähren. So führt z. B. der Verzehr von 100 g Paranüssen zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung der Knochen von etwa 0,07 mSv (7 mrem) (vgl. 7.8).

Abb. 8.5.3
Dosisleistung kosmischer Strahlung in Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel

Abb. 8.5.4
Die Intensität der kosmischen Strahlung weist in etwa 20 km Höhe ein Maximum auf [43, S. 204]

9 Künstliche Strahlenquellen

Außer der natürlichen Strahlenbelastung sind die Menschen auch einer zivilisatorisch bedingten Strahlenbelastung ausgesetzt. Sie kommt im wesentlichen durch folgende Anwendungen zustande:

- Strahleneinsatz in der Medizin (Diagnostik, Therapie)
- Betrieb von Kernkraftwerken und anderen kerntechnischen Anlagen
- Fallout von Kernwaffenversuchen
- Fallout nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl
- Anwendungen ionisierender Strahlen in Wissenschaft und Technik
- Störstrahler (z.B. Fernsehgeräte)
- Einsatz radioaktiver Stoffe bei verschiedenen Geräten (Leuchtzifferblatt von Uhren, Rauchdichtemelder)

Im folgenden werden nur die ersten vier Sachverhalte näher erläutert, weil nur sie einen nachweisbaren Beitrag zur Strahlenbelastung der Bevölkerung liefern.

Abb. 9.1.1
Herstellen einer Röntgenaufnahme

9.1 Medizinische Anwendung von Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen werden in der Medizin zur Diagnose und Therapie eingesetzt.

Bei der Diagnostik wird der zu untersuchende Körperteil eines Menschen durchstrahlt. Nach dem Austritt der Strahlen aus dem Körper läßt man sie auf einen Fluoreszenzschirm treffen (z. B. Zinksulfid), der dann aufleuchtet. Die Röntgenstrahlen selbst sind für Menschen nicht sichtbar (Abb. 9.1.1).

Da Röntgenstrahlen von verschiedenen Stoffen verschieden stark absorbiert werden, entstehen auf dem Schirm, einem Monitor oder einem Film Bilder vom Innern des Körpers. Organe mit größerer Strahlenabsorption (z. B. Knochen, Herz) führen zu hellen Stellen, solche mit geringerer Strahlenabsorption (z. B. Lungengewebe) zu dunkleren Stellen (Abb. 9.1.2).

Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik führen zu einer Strahlenbelastung des Menschen. Sie ist von der Art und dem Umfang der durchgeführten Untersuchung abhängig. Tabelle 9.1.1 gibt dafür einige Orientierungswerte, von denen im Einzelfall Abweichungen bis zum Faktor 10 möglich sind.

Bei Säuglingen und Kleinkindern treten andere als die in Tabelle 9.1.1 angegebenen Werte auf. Da ihre Körpermasse geringer ist, entsteht zwar weniger Röntgenstreustrahlung. Andererseits sind die Abstände der bestrahlten

Abb. 9.1.2
Röntgenaufnahme eines Brustkorbes

Anwendungs-bereich	Hautober-fläche	Knochen-mark	Keimdrüsen weibl.	männl.
Herzkatheter	410	90	36	17
Nieren-angiographie*)	300	10	30	12
Magen / Darm	160	7	4	1,4
Gallenblase	45	1	5	0,4
Becken	20	1	4	2
Lunge	1	0,2	0,03	0,01

Tabelle 9.1.1
Organdosen bei Röntgenuntersuchungen in mSv [37, S. 72]
*) Angiographie: Röntgenuntersuchung der Blut- und Lymphgefäße

Körperbereiche zu den Keimdrüsen nicht so groß wie bei Erwachsenen. Bei Säuglingen und Kleinkindern können also durch Röntgenuntersuchungen sowohl größere als auch kleinere Organdosen als bei Erwachsenen auftreten [60, S. 306].

Durch Verbesserung der Geräte und Untersuchungstechniken wird die Strahlendosis in Zukunft weiter reduziert werden können.

Abb. 9.1.3
Prinzip der Pendelbestrahlung

In der Therapie werden Röntgenstrahlen eingesetzt, um z.B. die Zellen bösartiger Tumore zu bestrahlen und dadurch abzutöten. Damit bei einem tieferliegenden Tumor nur der Krankheitsherd und nicht das umgebende Gewebe geschädigt wird, werden mehrere aufeinanderfolgende Bestrahlungen aus unterschiedlichen Richtungen vorgenommen. Dadurch wird der Krankheitsherd mehrfach, das übrige Gewebe aber nur einmalig bestrahlt. Im Krankheitsherd addiert sich die Strahlenwirkung.

Denselben Effekt kann man auch dadurch erreichen, daß die Strahlenquelle um den Patienten pendelt, wodurch die Strahlung auf den Krankheitsherd dauernd, auf das andere Gewebe aber sehr viel kürzere Zeit einwirkt (Abb. 9.1.3).

Bei der Strahlentherapie erhält ein Patient kurzzeitig höhere Teilkörperdosen als bei der Diagnostik. Die Dosis wird dabei so hoch gewählt, daß die kranken Zellen abgetötet werden. Die Werte der Tabelle 9.1.2 sind in der Literatur in Röntgen (R) angegeben. Wenn man für weiches Gewebe 1 R $\approx 10^{-2}$ Gy setzt und für Röntgenstrahlen den Qualitätsfaktor 1 einsetzt, erhält man 1 R $\approx$ 0,01 Sv = 10 mSv (vgl. 5.2).

Therapeutische Maßnahmen	Teilkörperdosis in R	umgerechnet in mSv
lokale Behandlung von Entzündungen	50–200	500–2 000
Krebsbehandlung normal maximal	3 000–5 000 10 000	30 000–50 000 100 000
Oberflächentherapie	10 000	100 000

Tabelle 9.1.2
Teilkörperdosen bei der Strahlentherapie [60, S. 308]

An dieser Stelle sei erneut angemerkt, daß Strahlendosen ab 4 000 mSv bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung bereits in 50% der Fälle zum Tode der bestrahlten Person führen (vgl. 6.5).

In der Bundesrepublik Deutschland werden im Mittel etwa zwei Röntgenuntersuchungen pro Person und Jahr durchgeführt. Daraus ist eine mittlere effektive Dosis für den einzelnen Einwohner von etwa 1,5 mSv / a (150 mrem / a) errechnet worden. Sie erreicht etwa 63 % des Gesamtwertes der natürlichen Strahlenbelastung. Der Beitrag durch strahlentherapeutische Maßnahmen mit geschätzten 1–2 % ist vernachlässigbar gering [37, S. 71ff. u. 81, S. 10].

Die für genetische Schäden bedeutsame Keimdrüsendosis durch die Röntgendiagnostik wird mit 0,5 mSv / a (50 mrem / a) pro Einwohner angegeben. Dieser Wert kann regional um etwa 50% schwanken.

9.2 Anwendungen von Radionukliden in der Medizin

Bei nuklearmedizinischen Untersuchungen wird dem Patienten eine radioaktive Substanz verabreicht, die vom Körper resorbiert und in bestimmte Organe transportiert wird. Da sie Strahlen aussendet, sind ihr Weg im Körper und die Stellen erhöhter Konzentration von außen gut zu verfolgen. Aus der Aufnahmegeschwindigkeit und der Konzentration im Organ oder Teilen davon lassen sich Rückschlüsse auf die Organfunktion ziehen oder auch Tumore erkennen.

Die verabreichten Substanzen enthalten radioaktive Isotope, die eine möglichst kurze Halbwertszeit besitzen, nicht zu lange im Körper gespeichert werden und deren Strahlung nicht zu energiereich ist. Es setzt voraus, daß besonders empfindliche Meßverfahren zur Verfügung stehen.

Ein besonders bekanntes Beispiel aus der Nuklearmedizin ist die Schilddrüsen-Funktionsprüfung. Wird dem Patienten eine bestimmte Menge I–131 oder Tc–99m injiziert, wird es in einigen Stunden bis zu 90 % in die Schilddrüse aufgenommen. Der zeitliche Verlauf der Aufnahme durch die Schilddrüse und die insgesamt gespeicherte Menge geben Auskunft über den Funktionszustand der Schilddrüse.

Abb. 9.2.1 zeigt ein sog. Schilddrüsen-Szintigramm. Das von der Schilddrüse aufgenommene Radionuklid sendet Strahlen aus, die ein Detektor von außen registriert. Ein angeschlossener Drucker zeichnet je nach der Anzahl der Impulse verschiedenfarbige Striche. Das Szintigramm zeigt die Lage und Größe der beiden Schilddrüsenlappen. Der erweiterte rechte Lappen weist auf eine Funktionsstörung hin.

Untersuchung	Radionuklid	angew. Aktivität in 10^6 Bq	Energiedosis in mGy		
			Keimdrüsen	Knochenmark	im untersuchten bzw. kritischen Organ
Schilddrüsen-Szintigrafie	Tc–99m I–131 I–123	40 2 8	0,15 0,08 0,04	0,2 0,2 0,1	4 1000 40
Leber-Szintigrafie	Tc–99m Au–198	50 5	0,1 0,2	0,4 4	5 (Leber) 3 (Milz) 60 (Leber) 20 (Milz)
Bauchspeicheldrüsen-Szintigramm	Se–75	10	25	25	60 (Leber) 35 (Bauchspeicheld.)

Tabelle 9.2.1
Mittlere Strahlenbelastung des Erwachsenen bei Untersuchungen mit radioaktiven Isotopen (1 mGy ≙ 1 mSv) [37, S. 73]

Abb. 9.2.1
Jod–131-Szintigramm einer Schilddrüse

Quelle: Philips Medizin Systeme GmbH

In welches Organ ein bestimmtes Radionuklid transportiert wird, ist auch davon abhängig, in welche chemische Verbindung es eingebaut worden ist.

Nach dem gleichen Verfahren lassen sich auch Therapiemaßnahmen durchführen. Da Iod praktisch ausschließlich in der Schilddrüse gespeichert wird, kann durch verabfolgtes radioaktives Iod (I–131, I–123) z. B. ein Schilddrüsentumor zerstört werden. Die von radioaktivem Iod ausgesandten Betateilchen haben in organischem Gewebe nur eine geringe Reichweite, so daß sie praktisch nur auf die Schilddrüse selbst einwirken.

Bei nuklearmedizinischen Diagnose- und Therapiemaßnahmen kann also die Individualdosis u. U. recht hoch sein. Die daraus abgeschätzte mittlere Kollektivdosis ist aber gering und beträgt nur wenige Prozent des Wertes, der für die Röntgendiagnostik gilt.

9.3 Strahlenquellen in einem Kernkraftwerk

Ein Kernreaktor stellt die z. Zt. größte künstliche Strahlenquelle dar. Durch eine Vielzahl von Sicherheitsmaßnahmen und Sicherheitseinrichtungen wird die Direktstrahlung abgeschirmt und die radioaktiven Stoffe sicher eingeschlossen.

Die von einem Kernreaktor ausgehende Strahlung hat fünf verschiedene Ursachen.

• Die verwendeten Uranisotope U-238 und U–235 sind radioaktiv. Sie zerfallen in mehreren Stufen zu inaktiven Bleiisotopen (natürliche Radioaktivitäts-Zerfallsreihen, vgl. 8.2).

Uran sendet beim Zerfall Alpha- und Gammastrahlen aus. Bei den Folgeprodukten tritt als weitere Strahlenart auch Betastrahlung auf. Auch vor Inbetriebnahme eines Reaktors liegt also eine Strahlenquelle vor, die drei Arten von Strahlen aussendet.

Die spezifische Aktivität von Natururan (ohne Folgeprodukte) ist relativ niedrig (Tab. 9.3.1).

• Bei der Spaltung der Kerne des U–235 mit Hilfe langsamer Neutronen tritt eine Neutronen- und Gammastrahlung auf.

Radionuklid	spez. Aktivität in Bq / g
U–nat.	ca. $2{,}54 \cdot 10^4$
I–131	ca. $4{,}6 \cdot 10^{15}$
Ra–226	$3{,}67 \cdot 10^{10}$

Tabelle 9.3.1
Spez. Aktivität von Natururan und einigen anderen Radionukliden

Beispiel:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{131}_{53}I + ^{102}_{39}Y + 3\,^{1}_{0}n + \gamma$$

Beide Strahlenarten haben ein hohes Durchdringungsvermögen. Sie müssen deshalb durch eine Reihe von Barrieren abgeschirmt werden.

Trifft ein langsames (thermisches) Neutron auf einen Atomkern des Uran–235, wird es in den Kern aufgenommen. Es entsteht ein hochangeregter Zwischenkern des Isotops Uran–236. Seine Lebensdauer beträgt nur etwa 10^{-14} s.
Der neue Kern versucht, seine Anregungsenergie abzugeben. In etwa 6 von 7 Fällen tritt eine Spaltung ein, in einem Fall geht der Atomkern durch Aussenden eines Gammaquants in das langlebige Isotop Uran–236 über (Alphastrahler, HWZ $2{,}342 \cdot 10^7$ a).

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, daß nach dem Einfang des Neutrons der Urankern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig verformt, hantelförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt (Abb. 9.3.1).

Die auseinanderfliegenden Spaltprodukte sowie die Neutronen versetzen das sie umgebende Kristallgitter in heftigere Schwingungen und erhöhen dadurch seine Temperatur. Etwa 31 Milliarden Spaltungen erzeugen eine Energiemenge von 1 Ws (vgl. 3.2).

• Eine weitere Quelle bilden die Aktivierungsprodukte. Zunächst inaktive Nuklide können sich durch Aufnahme eines freien Neutrons in Radionuklide umwandeln (vgl. 4.3).

A B C D

Abb. 9.3.1
Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung

$$^{58}_{26}Fe + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{59}_{26}Fe \quad \text{(Aktivierung)}$$

$$^{59}_{26}Fe \underset{\text{Hwz 45,1 d}}{\rightarrow} ^{59}_{27}Co + ^{0}_{-1}e + \gamma \quad \text{(rad. Zerfall)}$$

$$^{59}_{27}Co + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{60}_{27}Co \quad \text{(Aktivierung)}$$

$$^{60}_{27}Co \underset{\text{Hwz 5,272 a}}{\rightarrow} ^{60}_{28}Ni + ^{0}_{-1}e + \gamma \quad \text{(rad. Zerfall)}$$

Materialien im Bereich der Neutronenstrahlung, wie z. B. das Kühlmittel Wasser, der Beton, Stahl und seine Legierungsbestandteile, Korrosionsprodukte oder die Luft können auf diese Weise radioaktiv werden und dann über eine mehr oder weniger lange Zeit Strahlung aussenden.

• Neutronen mittlerer sowie höherer Geschwindigkeit können vom U–238 aufgenommen werden. Dabei tritt keine Kernspaltung, sondern eine Umwandlung in das Uranisotop U–239 ein. Es ist ein Betastrahler, der sich in mehreren Schritten zu Pu–239 umwandelt (Abb. 9.3.2).

Eine Umwandlung von U–238 zu Pu–239 findet in bestimmtem Umfang in jedem Leichtwasserreaktor statt. In sog. Brutreaktoren (Schneller Brüter) wird es gezielt erzeugt. Plutonium kann für Kernspaltungen eingesetzt werden.

• Die bei der Kernspaltung entstehenden Spaltprodukte sind aufgrund ihres Neutronenüberschusses meist radioaktiv. Sie stellen die fünfte Quelle ionisierender Strahlen dar.

Man kennt heute etwa 200 verschiedene Spaltprodukte, die sich auf 35 verschiedene Elemente beziehen (von Zink / Kernladungszahl 30 bis zum Terbium / Kernladungszahl 65).

Beispiele:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{147}_{57}La + ^{87}_{35}Br + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{89}_{36}Kr + ^{144}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{137}_{53}I + ^{96}_{39}Y + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{143}_{54}Xe + ^{90}_{38}Sr + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{137}_{55}Cs + ^{96}_{37}Rb + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{90}_{36}Kr + ^{144}_{56}Ba + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{135}_{52}Te + ^{98}_{40}Zr + 3\,^{1}_{0}n$$

Für einen Siedewasserreaktor ergeben sich in der Praxis folgende Werte für die Verteilung der radioaktiven Isotope bzw. Elemente (Tabelle 9.3.2):

Natururan	99,3 % Uran–238 0,7 % Uran–235
Angereichertes Uran für Brennelemente	96,5 % U–238 3,5 % U–235
„Abgebranntes" Uran (Abbrand 33 000 MWd / t)[1]	ca. 95,0 % U–238 ca. 0,8 % U–235 ca. 0,9 % Pu ca. 3,2 % Spaltprodukte ca. 0,1 % übrige Aktiniden[2]

Tabelle 9.3.2
Radionuklide im Kernbrennstoff

1) 1 MWd = 24000 kWh. Ein Abbrand von 33000 MWd / t bedeutet, daß der Brennstoff solange eingesetzt wird, bis pro Tonne eine Energie von 33 000 MWd gewonnen worden ist.

2) Als Aktiniden bezeichnet man die Elemente mit den Kernladungszahlen 89 (Aktinium) bis 109.

Abb.9.3.2
Entstehung von Pu–239 aus U–238

Die Massenzahlen der Trümmerkerne liegen etwa zwischen 70 und 160. Ein Maximum liegt bei der Massenzahl 95 (z.B. Strontium–90, Krypton–89, Zirkonium–93), ein zweites Maximum bei der Massenzahl 140 (z.B. Barium–140, Cäsium–137, Cer–144). Die Massenzahlen liegen am häufigsten im Verhältnis 2 : 3 zueinander.

Die Spaltprodukte wandeln sich unter Aussenden von Betastrahlen in stabile Kerne um. Dabei werden ganze Zerfallsreihen durchlaufen. Es ist aber auch Neutronenemission möglich.

Radioaktive Isotope eines bestimmten Elements (z.B. radioaktives Iod) können direkt bei der Kernspaltung oder beim nachträglichen Zerfall eines Spaltproduktes entstehen (Abb. 9.3.3 und 9.3.4).

(Radioaktive Ableitungen vgl. 11.4)

Sn : Zinn Mo : Molybdän Y : Yttrium
Sb : Antimon Te : Tellur Ba : Barium
I : Iod Xe : Xenon Cs : Cäsium

Abb. 9.3.3
Radioaktiver Zerfall des Sn–131

Abb. 9.3.4
Radioaktiver Zerfall des I–137

9.4 Durch Kernwaffentests erzeugte Radionuklide

Zwischen 1945 und 1989 wurden weltweit etwa 420 oberirdische und etwa 1050 unterirdische Kernwaffentests durchgeführt. Die genaue Anzahl ist nicht bekannt, da nicht alle Testexplosionen angezeigt worden sind [37, S. 75].

Der Höhepunkt der Tests in Bezug auf Anzahl und Sprengkraft der Explosionen lag in den Jahren 1961 und 1962. Seit 1963 gilt zwischen den USA, der UdSSR und Großbritannien ein Teststoppabkommen für oberirdische Kernwaffenversuche. Nur die Volksrepublik China und Frankreich haben seitdem über 63 oberirdische Tests vorgenommen [37, S. 75].

Kernwaffen beruhen auf dem Prinzip der Kernspaltung und gegebenenfalls zusätzlich der Kernfusion (Wasserstoffbombe).

Bei der Kernspaltungsbombe laufen in U–235 oder Pu–239 unkontrollierte Kettenreaktionen ab. Bei der Kernfusion verschmelzen Deuterium (H–2) oder Tritium (H–3) zu Helium. Die Sprengkraft beruht auf der dabei auftretenden Hitze- und Druckwelle. Außerdem entsteht eine sehr intensive Neutronen- und Gammastrahlung.

Die Gefährdung des Menschen durch Kernwaffentests wird ausschließlich durch die Radionuklide verursacht, die

Radionuklid	Halbwertszeit	freigesetzte Aktivität in 10^{18} Bq
H–3	12,323 a	240
C–14	5730 a	0,22
Sr–90	28,5 a	0,6
Zr–95	64,0 d	150
Ru–106	368 d	12
I–131	8,02 d	700
Cs–137	30,17 a	1
Ce–144	284,8 d	30
Pu–239	$2,411 \cdot 10^4$ a	0,01
Pu–240	6550 a	0,01

Tabelle 9.4.1
Aktivität einiger Radionuklide, die bisher bei oberirdischen Kernwaffentests freigesetzt wurden [37, S. 76]

Abb. 9.4.1
Cs–137- und Sr–90-Gehalt der Milch in der Bundesrepublik Deutschland (Monatsmittelwerte, ab 1976 Vierteljahresmittelwerte) [60, S. 323]

bei der Explosion entstehen. Es sind radioaktive Spaltprodukte und Aktivierungsprodukte sowie nicht gespaltenes Uran oder Plutonium.

Durch unterirdische Tests sind bisher keine Radionuklide in die Atmosphäre gelangt. Oberirdische Tests haben aber in der Atmosphäre Radionuklide freigesetzt, die sich nun auch in den Nahrungsketten befinden (Abb. 9.4.1).

Größere radioaktive Schwebstoffpartikel sinken meist innerhalb von 100 km wieder zu Boden. Bei geeignetem Explosionsort kann dieser lokale Fallout bis zu 50 % der gesamten Aktivität betragen. Kleinere radioaktive Schwebstoffpartikel werden bis in Höhen von 10 bis 100 km gehoben und mit Luftströmungen über große Entfernungen transportiert. Bei den niedrigeren Höhen werden Aktivitätswolken in unseren Breiten in etwa drei Wochen um die Erde geweht. In höheren Luftschichten verweilen die radioaktiven Schwebstoffe bis zu einigen Jahren. In dieser Zeit können sie global verteilt werden. Durch Luftaustausch gelangen sie in untere Luftschichten, von wo aus sie durch Sedimentation und Niederschlag den Erdboden erreichen [37, S. 75ff.].

Durch den weltweiten Fallout ist es zu einer äußeren und einer inneren Strahlenbelastung des Menschen gekommen.

Die äußere Bestrahlung wurde durch einige kurzlebige Radionuklide (z.B. Zr−95, Nb−95, Ru−103, Ba−140) und durch Cs−137 verursacht. Dabei waren praktisch nur die Gammastrahlen wirksam. Heute spielt im wesentlichen nur noch die innere Bestrahlung durch Cs−137 und Sr−90 eine Rolle.

Die Abb. 9.4.1 zeigt den Cs−137- und den Sr−90-Gehalt der Milch zwischen den Jahren 1960 und 1977. Obwohl der Höhepunkt der Kernwaffentests in den Jahren 1961 / 62 lag, stieg die spezifische Aktivität der Milch erst 1 bis 2 Jahre später an.

Umgekehrt wirkte sich das Teststoppabkommen von 1963 erst mit einigen Jahren Verzögerung aus.

Da der Mensch sich in einem dauernden Stoffaustausch mit seiner Umgebung befindet, zeigte die Cs−137-Aktivität des menschlichen Körpers einen ähnlichen Verlauf. (Abb. 9.4.2)

Die mittlere individuelle Strahlenbelastung in der Bundesrepublik Deutschland durch äußere und innere Strahleneinwirkungen auf Grund der Tests beträgt im Mittel weniger als 0,01 mSv / a (1 mrem / a). Sie lag z. Zt. der Kernwaffenversuche höher und nimmt im weiteren ständig ab [81, S. 10].

Abb. 9.4.2
Cs−137-Aktivität im menschlichen Körper [25, S. 16]

9.5 Der Reaktorunfall von Tschernobyl

Der Reaktorunfall von Tschernobyl am 26. April 1986 wurde durch Fehlbedienungen der Reaktorregelung ausgelöst. Dabei kam es zu einem so großen Temperaturanstieg in den Brennelementen, daß diese schmolzen. Der dadurch entstehende sehr hohe Wasserdampfdruck ließ die Druckrohre, in denen sich auch die Brennelemente befanden, platzen. Der Moderator Graphit geriet in Brand.

Aus dem zerstörten Reaktor gelangten Radionuklide ins Freie. Dafür ist von der Sowjetunion eine Aktivität von 10^{19} Bq angegeben worden. Das entspricht der Radionuklidfreisetzung bei einer Kernwaffenexplosion mit der Sprengkraft von 1 kt TNT (Trinitrotoluol, Sprengstoff). Die in der Umgebung des zerstörten Reaktors nachgewiesenen Radionuklide sind in der Tabelle 9.5.1 zusammengestellt [51, S. 63].

Durch die Brände, die nach dem Zerbersten auftraten, wurden radioaktive Stoffe in Höhen von 1 – 2 km transportiert (Schornsteinwirkung) und z.T. über weite Gebiete verteilt.

Die Windrichtung am 26. April führte die radioaktive Wolke zunächst nach Finnland. Durch Änderung der Windrichtung am 27. April wurden auch Süddeutschland und Nordpolen betroffen (Abb. 9.5.1).

Die höchsten Aktivitäten außerhalb der UdSSR traten in Süddeutschland, Österreich, Polen, Tschechoslowakei, Ungarn, Oberitalien und Nordjugoslawien auf. Innerhalb der einzelnen Gebiete gab es jedoch große Unterschiede, die im allgemeinen von der Niederschlagstätigkeit abhingen. Bei Regen wurden die Radionuklide aus der Luft ausgewaschen und gelangten in z.T. hoher Konzentration auf den Erdboden bzw. in die Gewässer.

Radionuklid	Kernladungszahl	Zerfallsart	Halbwertszeit
Kr–85 m	36	β, γ	4,48 h
Kr–85	36	β, γ	10,76 a
Sr–90	38	β	28,5 a
Sr–89	38	β, γ	50,5 d
Zr–95	40	β, γ	64,0 d
Mo–99	42	β, γ	66,0 d
Ru–103	44	β, γ	39,35 d
Ru–106	44	β	368 d
Te–132	52	β, γ	76,3 h
I–131	53	β, γ	8,02 d
Xe–133	54	β, γ	5,25 d
Cs–134	55	β, γ	2,06 a
Cs–137	55	β, γ	30,17 a
Ba–140	56	β, γ	12,75 d
Ce–141	58	β, γ	32,50 d
Ce–144	58	β, γ	284,8 d
Np–239	93	β, γ	2,355 d
Pu–238	94	α, γ	87,74 a
Pu–239	94	α, γ	$2{,}411 \cdot 10^4$ a
Pu–240	94	α, γ	6550 a
Pu–241	94	β, γ	14,4 a
Pu–242	94	α, γ	$3{,}763 \cdot 10^5$ a
Cm–242	96	α, γ	162,8 d

Tabelle 9.5.1
Freigesetzte Radionuklide in der Umgebung von Tschernobyl

Tschernobyl

26.4. Starttermin
27.4. erste Tageshälfte
27.4. zweite Tageshälfte
ab 1.5.

Tschernobyl

28.4. bis 29.4. mittags
29.4. mittags bis einschl. 30.4.
ab 1.5.

Abb. 9.5.1
Rekonstruierte Ausbreitungswege in 1500 m Höhe für die freigesetzten Radionuklide [19, S. 54]

Für die Bundesrepublik gilt, daß die spezifische Aktivität der Luft, des Bodens und der Nahrungsmittel im Norden geringer war als im Süden.

In der Bundesrepublik wurden eine Reihe von Radionukliden nachgewiesen. Dabei waren am Anfang im wesentlichen die I–131-Aktivität, anschließend die Cs–137-Aktivität von Bedeutung. Sie wird wegen der relativ langen Halbwertszeit des Radionuklids auch in Zukunft bestimmte Nahrungsmittel stark belasten.

Die Kontamination des Bodens durch I–131 und Cs–137 war in der ersten Maiwoche in ausgewählten Standorten der Bundesrepublik recht unterschiedlich (Tabelle 9.5.2).

Standort	spezifische Flächenaktivität des Bodens in Bq / m²	
	I–131	Cs–137
Südostbayern	32 000	20 000
München / Neuherberg	90 000	20 000
Offenbach	5 000	1 300
Berlin	5 000	1 300
Karlsruhe	10 000	1 500
Aachen / Jülich	2 600	1 000

Tabelle 9.5.2
Bodenkontamination in der Bundesrepublik Deutschland, Mai 1986
[19, S. 55].

Geht man bei I–131 und bei Cs–137 vereinfachend von einer mittleren Flächenaktivität von 10 000 Bq / m² = 10^4 Bq / m² aus, lassen sich die auf dem Bundesgebiet abgelagerten Gesamtmengen grob abschätzen.

Da die Bundesrepublik Deutschland eine Fläche von $2{,}5 \cdot 10^5$ km² = $2{,}5 \cdot 10^{11}$ m² hat, muß also die Gesamtaktivität A_g für jedes Radionuklid folgenden Betrag haben:

$A_g = 2{,}5 \cdot 10^{11}\ m^2 \cdot 10^4\ Bq / m^2 = 2{,}5 \cdot 10^{15}\ Bq$

Die spezifische Aktivität von I–131 beträgt
$A_{sp.} = 4{,}6 \cdot 10^{15}$ Bq / g.
Bei der Aktivität von $A = 2{,}5 \cdot 10^{15}$ Bq handelte es sich also um weniger als 1 g I–131, das auf dem gesamten Bundesgebiet abgelagert worden war.

Die spezifische Aktivität von Cs–137 beträgt
$A_{sp.} = 3{,}2 \cdot 10^{12}$ Bq / g. Bei der errechneten Aktivität
$A = 2{,}5 \cdot 10^{15}$ Bq muß es sich um etwa 780 g gehandelt haben.

Diese beiden Rechnungen zeigen, daß bereits geringe Substanzmengen zu relativ hohen Flächenaktivitäten führen.

Seit 1986 ist die Aktivität in den meisten Nahrungsmitteln auf sehr kleine Werte abgeklungen. Lediglich bei Reh- und Hirschfleisch sowie einigen Pilzarten sind durch Anreicherung hohe Konzentrationen entstanden (Stand: 1990).

Aufgrund der abgelagerten Aktivitäten ist es zu einer zusätzlichen Strahlenbelastung gekommen, die auch in Zukunft noch wirksam sein wird. Sie betrug 1986 je nach Wohnort zwischen 0,05 mSv und 1,1 mSv bei Erwachsenen und zwischen 0,1 mSv und 1,5 mSv bei Kleinkindern. Während der gesamten Lebenszeit werden Erwachsene eine zusätzliche Dosis zwischen 0,5 mSv im Norden und 6 mSv in Südbayern erhalten. Bei Kleinkindern in Bayern kann der Maximalwert evtl. bis zu 10 mSv betragen.

Bei den Kernwaffentests Mitte der 60er Jahre wurden von Cs–137 etwa 4000 Bq / m² und von Sr–90 etwa 2500 Bq / m² auf dem Boden abgelagert. Durch radioaktiven Zerfall sind davon heute noch < 3000 Bq / m² Cs–137 und < 2000 Bq / m² Sr–90 vorhanden. Ein Vergleich mit den in Neuherberg bei München gemessenen Werten zeigt, daß durch den Reaktorunfall von Tschernobyl von Cs–137 etwa fünfmal soviel abgeschieden wurde wie durch die Kernwaffentests. Bei Sr–90 war es dagegen nur 10% (Abb. 9.5.2) [10, S. 35].

Abb. 9.5.2
Bodenaktivität in kBq / m² (Meßort: Neuherberg bei München)

9.6 Vergleich von natürlicher und künstlicher Strahleneinwirkung

Natürliche und künstlich erzeugte Radionuklide senden gleichermaßen Alpha-, Beta- und Gammastrahlen aus. Die Energie der ausgesandten Teilchen und Quanten ist vergleichbar.

Bei der internen Strahlenbelastung spielen vor allem der Grad der Resorption, die räumliche Verteilung sowie die Verweildauer im Organismus eine Rolle. Es gibt bei beiden Radionuklidgruppen hohe und geringe Resorptionsgrade, teils homogene, teils inhomogene Verteilung im Organismus sowie sehr unterschiedliche biologische Halbwertszeiten. Künstlich erzeugte Radionuklide zeigen also diesbezüglich keine grundsätzlichen Besonderheiten.

Die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlen beruhen auf Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen oder Strahlungsquanten mit den Molekülen der lebenden Zellen. Dabei ist allein entscheidend, welche physikalischen Primäreffekte hervorgerufen werden – gleichgültig, ob das ionisierende Teilchen von einem natürlichen oder künstlich erzeugten Radionuklid ausgeschleudert wurde.

Radionuklide, die von kerntechnischen Anlagen bei Normalbetrieb abgegeben werden, führen nur zu einer geringen zusätzlichen Strahlenbelastung der Menschen. Bei den abgegebenen Radionukliden sind im wesentlichen Cs–137 und Sr–90 von Bedeutung.
Den entscheidenden Beitrag zur zivilisatorisch bedingten Strahlenbelastung des Menschen liefert die Anwendung ionisierender Strahlen in der Röntgendiagnostik. Eine Verringerung dieser Strahleneinwirkung wird in erster Linie durch neue Gerätesysteme und Untersuchungsverfahren erreicht werden.

Für einen Einwohner der Bundesrepublik Deutschland betrug 1988 die mittlere effektive Äquivalentdosisleistung etwa 4 mSv / a (400 mrem / a) [81, S. 10].

• Natürliche Strahleneinwirkung	ca.	2,4	mSv / a
• Zivilisatorische Strahleneinwirkung	ca.	1,55	mSv / a
• Strahleneinwirkung durch den Reaktorunfall in Tschernobyl	ca.	0,04	mSv / a
Summe	ca.	4	mSv / a

Die natürliche Strahlenbelastung für die Mehrzahl der Bevölkerung schwankt zwischen 1,5 mSv / a und 4 mSv / a. Es bedeutet, daß die Gesamtbelastung zwischen 3,1 mSv / a und 5,6 mSv / a liegt. Wenn aber die zivilisatorisch bedingte Strahleneinwirkung auf den Menschen keinen höheren Beitrag liefert als durch die Schwankungen der natürlichen Strahlenbelastung ohnehin gegeben ist, kann man davon ausgehen, daß praktisch keine zusätzlichen Schädigungen auftreten [10, S. 15ff.].

Bei den genannten Dosen treten somatische Frühschäden nicht auf. Bei somatischen Spätschäden (Krebs, Leukämie) und genetischen Schäden sind bei diesen geringen Dosen experimentelle Nachweise nicht möglich.
Man kann lediglich von hohen Dosen und den dabei auftretenden Effekten auf niedrigere Dosen zurückrechnen, indem man z.B. einen linearen Verlauf annimmt (vgl. 6.5).

Natürliche Strahleneinwirkung	ca. 2,4 mSv / a (240 mrem / a)
Zivilisatorische Strahleneinwirkung	ca. 1,55 mSv / a (155 mrem / a)
Strahleneinwirkung durch den Reaktorunfall in Tschernobyl (26. April 1986)	ca. 0,04 mSv / a (4 mrem / a)

Abb. 9.6.1
Mittlere effektive Strahlendosis in der Bundesrepublik Deutschland 1988 [81, S. 10]

10 Strahlenschutzmaßnahmen gegen äußere Strahleneinwirkung

Wenn sich eine Strahlenquelle außerhalb des menschlichen Körpers befindet, kann nur eine Strahleneinwirkung von außen stattfinden. Es stehen dann vier Schutzmaßnahmen zur Verfügung:

- soweit möglich Begrenzung der Quellstärke
- zeitliche Begrenzung der Strahleneinwirkung
- Einhaltung eines Sicherheitsabstandes
- Abschirmung der Strahlung

In der Strahlenschutzpraxis werden meist mehrere Schutzmaßnahmen gleichzeitig angewandt und dadurch die Schutzwirkung erhöht.

Die Planung von Schutzmaßnahmen gegen äußere Strahleneinwirkung wird nur vorgenommen, wenn die Intensität der Strahlung einen bestimmten Wert überschreitet und mit höheren Dosisleistungswerten gerechnet werden muß.

10.1 Begrenzung der Quellstärke

Eine ionisierende Strahlung besteht aus Teilchen oder Strahlungsquanten. Sie können biologische Effekte hervorrufen und zu Strahlenschäden führen. Eine erste Strahlenschutzmaßnahme besteht deshalb darin, die Anzahl der Teilchen bzw. Quanten zu reduzieren, die pro Zeit auf eine bestimmte Fläche trifft oder ein bestimmtes Körpervolumen durchsetzt. Es wird deshalb eine möglichst kleine Quellstärke gewählt [63, S. 69].

Beispiel 1:

Wenn z. B. bei einem Siedewasserreaktor im Steuerstabantriebsraum dringende Inspektionen vorgenommen werden müssen, verringert man die Leistung des Reaktors. Dazu werden die Steuerstäbe z. T. zwischen die Brennelemente eingefahren und dadurch die Anzahl der Kernspaltungen verringert. Die Anzahl der pro Zeit erzeugten Neutronen und Gammaquanten verringert sich dabei in gleichem Maße (Abb. 10.1.1).

Beim Absenken der Reaktorleistung auf angenommene 40% sinkt auch die Dosisleistung auf etwa 40%. Ein kurzzeitiger Aufenthalt im Steuerstabantriebsraum ist dann möglich, ohne daß die Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen überschritten werden (vgl. 12.1)

Dampf

Wasser

W_1 = 100 %

W_2 = 40 %

Abb. 10.1.1
Verringerung der Strahlungsintensität durch Absenken der Reaktorleistung (1. Brennelement, 2. Steuerstab, 3. Reaktordruckbehälter)

Beispiel 2:
In Forschung, Technik und Ausbildung werden Radionuklide als Strahlenquellen eingesetzt. Dabei gilt: je höher die Aktivität der Quelle ist, desto größer ist auch die Dosisleistung für eine damit arbeitende Person (unter sonst gleichen Bedingungen) (Abb. 10.1.2). Zur Verringerung der Strahlendosis werden deshalb möglichst geringe Aktivitäten eingesetzt. Um dabei aber den mittleren statistischen Fehler nicht zu groß werden zu lassen, muß man die Meßzeit entsprechend verlängern. Für den Experimentator kann sich dadurch letztlich doch eine erhöhte Strahlendosis ergeben. Es ist deshalb in jedem Einzelfall zu entscheiden, welche Aktivität der Strahlenquelle und welche Meßzeit am günstigsten sind.
Bei Mehrfachmessungen mit einer konstanten Versuchsanordnung ergeben sich voneinander abweichende Impulsraten (Anzahl der Zählrohrimpulse pro Zeit). Aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung läßt sich eine Aussage über die zu erwartende Abweichung einer Einzelmessung vom Mittelwert $\bar{n}$ machen:
68,3 % der gemessenen Werte liegen im Intervall $\bar{n} \pm \sqrt{\bar{n}}$,
95,4 % der Meßwerte liegen im Intervall $\bar{n} \pm 2 \cdot \sqrt{\bar{n}}$ und
99,7 % der Meßwerte im Intervall $\bar{n} \pm 3 \cdot \sqrt{\bar{n}}$.
Die Größe $\sqrt{\bar{n}}$ wird Standardabweichung oder mittlerer statistischer Fehler genannt. Die Standardabweichung, ausgedrückt in Prozent des Mittelwertes, wird auch relativer statistischer Fehler genannt. Tabelle 10.1.1 zeigt, daß der relative statistische Fehler desto größer ist, je kürzer die Meßzeit gewählt wird.

Meßzeit	Mittelwert $\bar{n}$ *)	Standardabweichung $\sqrt{\bar{n}}$	Standardabweichung in %
10 s	106	10	9,4
60 s	638	25	3,9
120 s	1258	36	2,9

*) (berechnet aus 5 Einzelmessungen)

Tabelle 10.1.1
Messungen an einem Gasglühstrumpf (Thoriumnitrat) mit 0,5 cm Abstand zum Zählrohr

Beispiel 3:
Bei der Anwendung von Röntgenstrahlen in der medizinischen Diagnostik werden heute weitgehend elektronische Bildverstärker eingesetzt. Zur Erzeugung eines optimalen Bildes kommt man dann mit einer geringeren Strahlungsintensität aus. Sie wird dadurch herbeigeführt, daß man in der Röntgenröhre eine geringere Heizstromstärke einstellt (Abb. 10.1.3) (vgl. 3.5).

Die Verringerung der Quellstärke führt dann dazu, daß der Patient eine geringere Strahlendosis erhält.

Abb. 10.1.2
Die Dosisleistung ist von der Aktivität der Strahlenquelle abhängig

Abb. 10.1.3
Röntgengerät mit Bildverstärker

Quelle: Philips Medizin Systeme GmbH

10.2 Verringerung der Bestrahlungszeit

Die von einer Person empfangene Strahlendosis ist der Zeit proportional. Eine Verdoppelung oder Verzehnfachung der Bestrahlungszeit führt auch zur zwei- bzw. zehnfachen Strahlendosis (Abb. 10.2.1).

$t_0 = 0$ min
$D_0 = 0\,\mu$Sv

$t_1 = 15$ min
$D_1 = 5\,\mu$Sv

$t_2 = 30$ min
$D_2 = 10\,\mu$Sv

Abb. 10.2.1
Die Strahlendosis ist von der Bestrahlungszeit abhängig

Eine wichtige Strahlenschutzmaßnahme liegt also in der Verringerung der Bestrahlungszeit. Je stärker eine Strahlenquelle ist, desto größer wird die Bedeutung dieser Schutzmaßnahme.

Beispiel 1:
Müssen in einem Kernkraftwerk Arbeiten in der Nähe starker Strahlenquellen ausgeführt werden, trainiert man die Arbeiten zuvor an einem Modell in der Werkstatt. Am Arbeitsplatz selbst kann dann die Arbeit in kürzerer Zeit erledigt werden.

Ist eine Kontrolle der ausgeführten Arbeit durch eine zweite Person notwendig, wartet der Kontrolleur während der Arbeit in größerer Entfernung oder hinter einer Abschirmung und sucht den Arbeitsplatz erst nach Beendigung der Arbeit auf.

Beispiel 2:
Bei der Röntgendiagnostik führt der Arzt die Beobachtungen möglichst nicht während der „Durchleuchtungen" durch, sondern betrachtet die aufgezeichneten Bilder anschließend. Es kann sich dabei um Filme oder elektronisch aufgezeichnete Bilder handeln. Letztere lassen sich auf einem Fernsehbildschirm betrachten (Abb. 10.2.2).
Durch diese Maßnahmen konnten die Dosiswerte für Patienten und Ärzte um fast 70 % herabgesetzt werden.

Beispiel 3:
Bei nuklearmedizinischen Untersuchungen wählt man Radionuklide mit nicht zu langer physikalischer und biologischer Halbwertszeit.

Früher wurde z.B. bei der Funktionsprüfung der Nieren u.a. das I–131 eingesetzt. Man baute es in eine geeignete chemische Verbindung ein, die vorzugsweise von den Nieren aufgenommen wurde. Heute verwendet man praktisch nur noch I–123. Es hat eine deutlich geringere Halbwertszeit, sendet keine Betateilchen aus und emittiert Gammaquanten deutlich niedrigerer Energie (Tabelle 10.2.1).

Abb. 10.2.2 Quelle: Philips Medizin Systeme GmbH
Darstellung eines Röntgenbildes auf einem Monitor

Radionuklid	HWZ	Zerfallsart	Energie der Gammaquanten in keV
I–131	8,02 d	β^-	364, 637, 284
I–123	13,2 h	Elektronen-einfang	159

Tabelle 10.2.1
Angaben zu den Radionukliden I–131 und I–123 [60, S. 308]

Für den Patienten ist die Dosisleistung auch dann noch geringer, wenn bei I–123 eine mehrfach höhere Aktivität gewählt wird, als sonst bei I–131 üblich war.

Beispiel 4:
Durch den Massenlufttransport in 7–12 km Höhe sind die Flugzeugbesatzungen einer erhöhten natürlichen Strahlenbelastung ausgesetzt. Sie beträgt etwa 0,002 mSv / h. Bei 600 Flugstunden im Jahr ergibt sich für die Einzelperson eine zusätzliche Jahresdosis von etwa 1,2 mSv (120 mrem).

Eine Verringerung der Jahresdosis ist nur durch weniger Flugstunden oder niedrigere Flughöhen möglich (kürzere Aufenthaltsdauer in Höhen mit intensiverer kosmischer Strahlung).

10.3 Einhaltung eines Sicherheitsabstandes

Ein weiterer Schutz gegen ionisierende Strahlung besteht darin, einen genügend großen Abstand zur Strahlenquelle einzuhalten.

Wenn die Strahlenquelle punktartig ist, sich im leeren Raum befindet und die Strahlen gleichmäßig nach allen Seiten aussendet (isotrope Strahlenquelle), gilt das sog. quadratische Abstandsgesetz: Die Intensität der Strahlung nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Es bedeutet:

2fache Entfernung – 1/4 der ursprünglichen Strahlungsintensität
3fache Entfernung – 1/9 der ursprünglichen Strahlungsintensität
4fache Entfernung – 1/16 der ursprünglichen Strahlungsintensität
usw.

Daß die Intensität der Strahlung mit der Entfernung von der Strahlenquelle abnimmt, ist darin begründet, daß die Dichte der von einer Quelle divergierend nach allen Seiten ausgesandten Teilchen oder Gammaquanten mit der Entfernung von der Quelle immer mehr abnimmt. Unter den angenommenen Bedingungen gilt dann: $I \sim 1 / r^2$ (Abb. 10.3.1).

Bei flächenförmigen Quellen nimmt die Intensität wesentlich geringer, in besonderen Fällen sogar linear mit der Entfernung ab ($I \sim 1 / r$).

In der Praxis kann eine Strahlenquelle als punktartig angesehen werden, wenn der gewählte Abstand 5mal so groß ist wie die Ausdehnung der Quelle.

Beispiel:

Wird eine geringe Menge radioaktiver Substanz, die in einer Kugel mit $d = 0{,}5$ cm eingeschlossen ist, mit den Fingern angefaßt, so ist die Haut 0,5 cm vom Mittelpunkt der Kugel entfernt. Packt man die Kugel dagegen mit einer Pinzette, so ist die Hand etwa 10 cm vom Kugelmittelpunkt entfernt. Durch die 20fache Entfernung beträgt die Strahlungsintensität $1 / 20^2 = 1 / 400$ des ursprünglichen Wertes (Abb. 10.3.2).

In kerntechnischen Anlagen und Laboratorien werden deshalb Werkzeuge mit längeren Griffen als sonst üblich verwendet. Bei 1 m langen Griffen läßt sich die Dosisleistung um den Faktor 10^4 verringern (Abb. 10.3.3).

In der Praxis ist zusätzlich zu bedenken, daß die Strahlung durch die im Raum vorhandene Luft ganz oder teilweise absorbiert wird. Außerdem können Strahlungsteilchen und Gammaquanten an Körpern gestreut werden (Tisch, Wände, Fußboden, Beobachtungsspiegel usw.). In besonderen Fällen ist es dann möglich, daß die Intensität der Strahlung an bestimmten Stellen höher ist, als es nach dem Abstandsgesetz zu erwarten wäre.

Abb. 10.3.1
$I \sim 1 / r^2$

Abb. 10.3.2
Vergrößerung des Abstandes zur Strahlenquelle durch Verwendung einer Pinzette

Abb. 10.3.3
Strahlenschutz in einem Isotopenlabor durch Verwendung einer Zange mit langem Griff

10.4 Abschirmung der Strahlung

Bei der Abschirmung ionisierender Strahlen finden Wechselwirkungen der Strahlungsteilchen und Quanten mit dem Abschirmmaterial statt. Dabei können Energie und Bewegungsrichtung der Teilchen und Quanten geändert werden, andere Strahlungsteilchen oder Quanten entstehen oder die Strahlung völlig verschwinden.

Abschirmung von Alphastrahlen

Alphateilchen geben ihre Energie im wesentlichen dadurch ab, daß sie Atome oder Moleküle der durchstrahlten Materie ionisieren oder anregen. Da die Ionen in sehr großer Dichte erzeugt werden, verlieren Alphateilchen ihre Energie auf sehr kurzer Strecke. In Luft beträgt die Reichweite deshalb nur wenige Zentimeter, im Gewebe weniger als 0,1 mm. Im Prinzip lassen sich Alphastrahlen also bereits durch ein Blatt Papier vollständig abschirmen.

Teilchen-energie in MeV	Reichweite in Luft (1013 hPa)	Reichweite in Muskel-gewebe	Reichweite in Aluminium
1	0,32 cm	4 μm	2 μm
3	1,6 cm	16 μm	–
4	2,5 cm	31 μm	16 μm
6	4,6 cm	56 μm	30 μm
8	7,4 cm	91 μm	48 μm
10	10,6 cm	130 μm	67 μm

Tabelle 10.4.1
Reichweite von Alphateilchen verschiedener Energie in Luft, Muskelgewebe und Aluminium (1 μm = 10^{-6} m) [60, S. 33]

Die geringe Reichweite von Alphateilchen in Luft bewirkt, daß in etwa 10 cm Entfernung von der Strahlenquelle keine Belastung des Menschen durch Alphateilchen auftreten kann.
In der Meßtechnik muß die geringe Reichweite von Alphateilchen in Luft berücksichtigt werden. Außerdem können bei Strahlungsdetektoren, mit denen Alphastrahlen registriert werden sollen, nur extrem dünne Strahleneintrittsfenster verwendet werden.

Treffen Alphateilchen auf unbekleidete Körperteile des Menschen, werden sie bereits durch die oberen Hautschichten vollständig abgeschirmt. Die Haut selbst kann aber u. U. geschädigt werden.

Abb. 10.4.1
Abhängigkeit der Reichweite von Alphateilchen in Luft von der Anfangsenergie

Abschirmung von Betastrahlen

Treffen Betateilchen auf Materie, verlieren sie ihre Energie durch Ionisationen, Anregung, Streuung und Erzeugung von Bremsstrahlung. Ionisation und Erzeugung von Bremsstrahlung sind die wichtigsten Wechselwirkungsprozesse.

Die Betateilchen treten im wesentlichen mit den Hüllelektronen der Atome in Wechselwirkung. Daraus folgt, daß sie ihre Energie auf desto kürzeren Strecken verlieren, je größer Dichte und Ordnungszahl des Abschirmmaterials sind.

In der Praxis werden zur Abschirmung von Betastrahlen jedoch keine Materialien höherer Ordnungszahl verwendet, weil die Energie der auftretenden Bremsstrahlung mit der Ordnungszahl wächst. Die „härtere" Bremsstrahlung müßte dann ihrerseits durch zusätzliche Materialschichten abgeschirmt werden.

Zur optimalen Abschirmung von Betastrahlen wird eine Kombination zweier verschiedener Materialien verwendet. Der Strahlenquelle zugewandt ist ein Absorbermaterial niedriger Ordnungszahl, wobei die Materialdicke etwas größer gewählt wird als die Reichweite der Betastrahlen in diesem Material. Dadurch wird die Betastrahlung vollständig absorbiert, und es entsteht nur wenig Bremsstrahlung geringerer Energie. Ein zusätzliches Material hoher Ordnungszahl (z. B. Blei) schwächt dann die Bremsstrahlung. Es kann bei Strahlenquellen geringer Stärke entfallen (Abb. 10.4.2).

Die maximale Energie von Betateilchen, die die meisten Radionuklide aussenden, ist nicht größer als 1 MeV bis 2 MeV. Zur vollständigen Abschirmung sind also 4 mm Aluminium ausreichend. Neben Aluminium werden auch Kunststoffe zur Abschirmung von Betastrahlen eingesetzt (Abb. 10.4.3).

Abb. 10.4.2
Materialkombination für die optimale Abschirmung von Betastrahlen (ST: Streueffekte).

Teilchen-energie in MeV	Luft (1013 hPa)	Reichweite in Körper-gewebe	Aluminium
0,01	0,003 m	0,0025 mm	0,009 mm
0,1	0,10 m	0,16 mm	0,050 mm
0,5	1,20 m	1,87 mm	0,60 mm
1,0	3,06 m	4,75 mm	1,52 mm
2	7,10 m	11,14 mm	4,08 mm
5	19,0 m	27,8 mm	9,9 mm
10	39,0 m	60,8 mm	19,2 mm
20	78 m	123 mm	39,0 mm

Tabelle 10.4.2
Reichweite von Betateilchen verschiedener Energie in Luft, Körpergewebe und Aluminium [46, S. 229]

Betateilchen, die von außen auf den menschlichen Körper treffen, dringen nur wenige Millimeter ein. Es können also nur die obersten Hautschichten geschädigt werden. Eine Ausnahme bildet das Auge. Durch Betastrahlen kann es zur Trübung der Augenlinse kommen.

Abb. 10.4.3
Unterschiedliche Absorption von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung

Abschirmung von Gammastrahlen

Durchdringt Gammastrahlung Materie, wird sie durch eine Reihe von Wechselwirkungsprozessen, die mit den Hüllelektronen oder den Atomkernen stattfinden, geschwächt. Diese Prozesse sind als reine Treffervorgänge aufzufassen, also Zufallsereignisse. Es läßt sich deshalb immer nur ein bestimmter Anteil der Strahlung abschirmen, nicht aber die gesamte Strahlung. Einzelne Gammaquanten können beliebig dicke Materieschichten durchdringen, wobei die Wahrscheinlichkeit dafür mit wachsender Schichtdicke immer geringer wird. Die Abschirmung der Gammastrahlung ist somit schwieriger als die der Alpha- oder Betastrahlung.

Für Gammastrahlung läßt sich keine maximale Reichweite angeben. Durch Absorbermaterialien erreicht man lediglich eine Schwächung der Strahlungsintensität auf einen bestimmten Bruchteil. Dabei hängt die Stärke der Schwächung von der Energie der Strahlung und dem verwendeten Abschirmmaterial ab. Höhere Energie der Gammaquanten bedeutet ein größeres Durchdringungsvermögen, und eine höhere Ordnungszahl des Wechselwirkungsmaterials führt zu einer größeren Abschirmwirkung.

Die Energiebeträge der Gammaquanten, die von natürlichen und künstlichen Radionukliden bzw. bei Wechselwirkungsprozessen emittiert werden, liegen im Bereich von 0,003 MeV bis etwa 17 MeV. Abhängig von der Energie treten bei der Absorption im wesentlichen drei Wechselwirkungsprozesse auf: der Photoeffekt, der Comptoneffekt und der Paarbildungseffekt. Diese drei Effekte überlagern sich im Wechselwirkungsmaterial, wobei in einzelnen Energiebereichen einer der Prozesse überwiegt.

Zur Abschätzung der Materialdicken, die für die Strahlenabschirmung benötigt werden, hat man für die Strahlenschutzpraxis die Halbwertsschicht und die Zehntelwertsschicht definiert. Durch diese Schichten wird die Intensität der Strahlung auf die Hälfte bzw. ein Zehntel reduziert. Die Dicken von Halbwertsschicht und Zehntelwertsschicht sind von der Energie der Gammaquanten und dem verwendeten Material abhängig. Dabei gilt in einem bestimmten Bereich, daß die Halbwertsschicht um so dicker ist, je höher die Quantenenergie liegt. Umgekehrt ist die Dicke der Halbwertsschicht ein Maß für die Energie und damit auch für die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung.

Durch eine Halbwertsschicht wird die Strahlungsintensität auf $(\frac{1}{2})^1 = 1/2$, durch zwei Schichten auf $(\frac{1}{2})^2 = 1/4$ und durch drei Schichten auf $(\frac{1}{2})^3 = 1/8$ herabgesetzt. Bei 10 Halbwertsschichten beträgt der Schwächungsfaktor dann $(\frac{1}{2})^{10} = 1/1024 \approx 0{,}1\ \%$ (Abb. 10.4.4).

Aus der letzten Spalte der Tabelle 10.4.3 ist zu erkennen, daß die Dicke der Halbwertsschicht bei wachsender Energie zunimmt, bei einer weiteren Energieerhöhung aber wieder abnimmt. Es rührt daher, daß die Gammastrahlung jetzt nicht nur durch den Photo- und den Comptoneffekt, sondern auch durch den Paarbildungseffekt Energie verliert. Durch Paarbildung werden aber Elektronen und Positronen erzeugt, die ein geringeres Durchdringungsvermögen besitzen und für deren Abschirmung geringere Materialdicken und somit auch geringere Halbwertsschichten erforderlich sind.

Für den Schutz vor Gammastrahlung ist Blei (z. B. in Form von Bleiziegeln) ein geeignetes Abschirmmaterial. In besonderen Fällen werden wegen der höheren Dichte Wolfram oder abgereichertes Uran verwendet, da sie zu einer noch stärkeren Schwächung der Strahlung führen. Da sie aber nicht immer verfügbar sind und ihre Bereitstellung hohe Kosten verursacht, spielen sie in der Strahlenschutzpraxis keine bedeutsame Rolle. Steht für den Strahlenschutz genügend Raum zur Verfügung, können auch andere, billigere Materialien verwendet werden, z. B. Eisen, Beton oder auch Wasser. Es ist dann eine dem Blei äquivalente, dickere Materialschicht zu wählen.

1. Halbwerts-schicht
2. Halbwerts-schicht
3. Halbwerts-schicht
4. Halbwerts-schicht

$\frac{1}{1}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{1}{16}$

Abb. 10.4.4
Durch jede Halbwertsschicht wird die Strahlungsintensität um den Faktor 2 geschwächt (schematische Darstellung, Streuung nicht berücksichtigt)

Energie in MeV / Materieschicht in cm	0,1	0,5	1	5	10	100
Wasser:						
Halbwertsschicht	4,15	7,18	9,85	23,1	31,6	40,2
Zehntelwertsschicht	13,8	23,8	32,7	76,6	105	133
Beton:						
Halbwertsschicht	1,75	3,41	4,66	10,3	12,9	12,5
Zehntelwertsschicht	5,81	11,4	15,5	34,0	43,0	40,6
Eisen:						
Halbwertsschicht	0,257	1,06	1,47	2,82	3,02	2,10
Zehntelwertsschicht	0,855	3,54	4,91	9,40	10,0	6,96
Blei:						
Halbwertsschicht	0,0118	0,422	0,893	1,43	1,21	0,642
Zehntelwertsschicht	0,0386	1,41	2,97	4,78	4,05	2,03

Tabelle 10.4.3
Halbwerts- und Zehntelwertsschicht für Gammaquanten unterschiedlicher Energie [46, S. 233]

Die Schwächung einer Gammastrahlung durch Materie hängt von der Energie der Quanten, der Art und Dicke des Abschirmmaterials und der geometrischen Form des Strahlenbündels ab.

Bei der Schwächung einer Gammastrahlung werden die Quanten im Abschirmmaterial absorbiert oder aus dem ursprünglichen Strahlenbündel gestreut. Bei einem schmalen Strahlenbündel können die gestreuten Quanten nicht mehr in das Meßgerät gelangen. Es registriert dann nur die Quanten, die mit dem Abschirmmaterial nicht in Wechselwirkung getreten sind (Abb.10.4.5).

Bei einem breiten Strahlenbündel können auch einmal oder mehrmals gestreute Gammaquanten in das Meßgerät gelangen.

Sie tragen daher an der Meßstelle zur Erhöhung der Dosisleistung bei.

Absorber
gestreutes Gammaquant
schmales Strahlenbündel
Meß-gerät
absorbiertes Gammaquant
breites Strahlenbündel
Absorber
gestreutes Gammaquant
Meß-gerät
absorbiertes Gammaquant

Abb. 10.4.5
Schwächung eines schmalen und eines breiten Strahlenbündels durch einen Absorber

Abschirmung von Neutronenstrahlen

Bei Neutronenstrahlen ist die Dosisleistung desto höher, je größer die Energie der Neutronen ist. In einem ersten Schritt muß deshalb ihre Geschwindigkeit herabgesetzt werden. Dazu eignen sich am besten wasserstoffhaltige Materialien (z.B. Polyäthylen, Paraffin, Wasser), da die Masse von Neutron und Wasserstoffkern (Proton) praktisch gleich groß ist und bei Stößen besonders hohe Energiebeträge übertragen werden können.

Stoff	Anzahl der Stöße zur Abbremsung von 2 MeV auf 0,025 eV
Wasserstoff	18
Wasser	19
Deuterium	25
Schweres Wasser	35
Helium	43
Beryllium	86
Kohlenstoff	114
Sauerstoff	150
Uran	2172

Tabelle 10.4.4
Mittlere Stoßzahl bei der Abbremsung schneller Neutronen [46, S. 233]

Auch Neutronen mit thermischen Geschwindigkeiten sind für den Menschen noch gefährlich. Sie können von Atomkernen eingefangen werden und dabei Strahlung aussenden oder zuvor nicht radioaktive Kerne in radioaktive Kerne umwandeln. – In einem zweiten Schritt müssen deshalb die thermischen Neutronen eingefangen werden. Dafür eignen sich z. B. Bor oder Cadmium. Eine 6,5 mm dicke Boralschicht (Aluminium + B_4C-Zusatz) schwächt den Fluß thermischer Neutronen um den Faktor 10^{10} [60, S. 244].

Beim Einfang der Neutronen durch Bor oder Cadmium wird eine Sekundärstrahlung ausgesandt.

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma$$

$$^{113}_{48}\mathrm{Cd} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{114}_{48}\mathrm{Cd} + \gamma$$

Zur Abschirmung dieser Sekundärstrahlung müssen Materialien großer Ordnungszahl eingesetzt werden, damit die Gammastrahlung sicher absorbiert wird. Ein klassischer Neutronenschild besteht also aus drei Schichten (Abb. 10.4.6).

Statt eines relativ teuren, mehrschichtigen Neutronenschildes können auch dickere Betonwände eingesetzt werden. Es wird Spezialbeton mit bestimmten Zuschlägen verwendet, so daß Neutronenabbremsung, Neutroneneinfang und Gammaabschirmung sicher gewährleistet sind. In einem Kernkraftwerk übernimmt ein 2 m dicker Schild aus Spezialbeton diese Aufgabe.

Abschirmmaterial	Halbwertsschicht d_H in cm	Zehntelwertsschicht d_Z in cm
Polyäthylen	6,3	21
Wasser	7	23
Normalbeton	7,5	25

Tabelle 10.4.5
Effektive Halbwerts- und Zehntelwertsschicht für Neutronen schmaler Strahlenbündel (Neutronenerzeugung durch Uranspaltungen) [63, S. 218]

Abb. 10.4.6
Grundsätzlicher Aufbau eines Neutronenschildes [60, S. 244f.]

10.5 Abschirmung der Direktstrahlung in einem Kernkraftwerk

In einem Kernkraftwerk treten Alpha-, Beta-, Gamma- und Neutronenstrahlen auf. Diese Direktstrahlung wird durch eine Reihe von Barrieren praktisch vollständig abgeschirmt (Abb. 10.5.1).

Alpha- und Betateilchen werden durch die Metallwand der Brennstäbe und das sie umgebende Wasser zu 100 % zurückgehalten. Die Gamma- und Neutronenstrahlen können den Reaktordruckbehälter aus Stahl z. T. durchdringen; dabei werden sie jedoch deutlich geschwächt. Die bis zu 25 cm starke Stahlwand des Druckbehälters verringert die Intensität der direkten Gammastrahlung bereits auf den 100 000sten Teil der Strahlung im Reaktorkern. Eine nahezu vollständige Abschirmung der verbleibenden Gammastrahlen und der Neutronenstrahlen geschieht durch einen 2 m dicken Schild aus Stahlbeton, der den Reaktorbehälter umgibt. Die Direktstrahlung ist dann auf 1 Billionstel (10^{-12}) reduziert. Sicherheitsbehälter und Reaktorgebäude bilden weitere Abschirmungen, so daß außerhalb des Kernkraftwerkes praktisch keine Direktstrahlung mehr auftritt [53, S. 26].

Außer dem Reaktor werden auch alle anderen Bereiche eines Kernkraftwerkes abgeschirmt, von denen eine erhöhte Strahlung ausgeht. So gelangen z. B. bei einem Siedewasserreaktor mit dem Dampf auch radioaktive Stoffe in die Dampfturbine, so daß von ihr Strahlen ausgehen. Zur Abschirmung dieser Direktstrahlung wird die Turbine eines Siedewasserreaktors deshalb mit Betonwänden umgeben (Sperrbereich).

Türen, die in einen Sperrbereich führen, enthalten zur Abschirmung der Gammastrahlung Bleiplatten. (Abb. 10.5.2).

RADIOAKTIV
Sperrbereich
Kein Zutritt
Vorsicht Strahlung
F02 44-2

Abb. 10.5.2
Tür vor einem Sperrbereich (verschlossen)

1 Brennstoff-Kristallgitter
2 Brennstabhülle
3 Reaktordruckbehälter
4 Biologischer Schild
5 Sicherheitsbehälter mit Dichthaut
6 Reaktorgebäude
St Steuerstäbe
U Umwälzpumpen

Abb. 10.5.1
Abschirmung der Direktstrahlung durch mehrere Barrieren

Zur mobilen Abschirmung werden Bleimatten an Gerüsten befestigt (Abb. 10.5.3).

Dadurch kann man jeden Arbeitsplatz den Anforderungen entsprechend abschirmen. In Sonderfällen werden auch Abschirmungen nach Maß angefertigt.

Abb. 10.5.3
Bleimatten zur mobilen Abschirmung

Abgebrannte Brennelemente werden in einem Becken unter einer 2 m dicken Wasserschicht gelagert. Das Wasser dient der Strahlenabschirmung und zur Ableitung der Nachzerfallswärme (Abb.10.5.5).

Abb. 10.5.5
Brennelementlagerbecken

Schwach- und mittelaktive Abfälle, die in einem Kernkraftwerk anfallen, verpackt man in Stahlfässer. Ihr Transport in das Zwischenlager wird durch ein Bleiglasfenster überwacht (Abb.10.5.4).
Die Brennelemente werden in speziellen Transportbehältern in ein Zwischenlager transportiert. Die Behälter sind so konstruiert, daß eine Strahlenabschirmung, eine ausreichende Kühlung sowie eine hohe Stabilität, wie sie für mögliche Unfälle beim Transport gefordert wird, gewährleistet sind (Abb.10.5.6).

Abb. 10.5.4
Beobachtung des Faßtransportes durch ein Bleiglasfenster

Abb. 10.5.6
Transportbehälter für abgebrannte Brennelemente

11 Strahlenschutzmaßnahmen gegen innere Strahleneinwirkung

Radioaktive Stoffe können mit der Atemluft und der Nahrung in den menschlichen Körper gelangen und dann in seinem Innern Strahlen aussenden. Dabei gibt es gegenüber der äußeren Strahleneinwirkung drei Besonderheiten.

• Die äußere Strahleneinwirkung läßt sich in der Regel begrenzen, indem man sich nur kurze Zeit in der Nähe der Strahlenquelle aufhält, einen Sicherheitsabstand einhält und sich gegebenenfalls abschirmt.

Befindet sich die Strahlenquelle aber im menschlichen Körper, können diese Schutzmaßnahmen nicht mehr angewandt werden. Man muß dann abwarten, bis das Radionuklid zerfallen bzw. vom Körper ausgeschieden worden ist (effektive Halbwertszeit, vgl. 7.6). In vielen Fällen läßt sich die Ausscheidung mit Hilfe von Medikamenten beschleunigen.

• Bei einer äußeren Strahleneinwirkung können Alphateilchen die menschliche Haut nicht durchdringen. Betateilchen dringen nur wenige Millimeter in den menschlichen Körper ein. Die inneren Organe des Menschen werden also nicht erreicht. – Anders liegen die Verhältnisse, wenn sich radioaktive Stoffe in den Organen des Menschen befinden. Sie senden dann in ihnen selbst Alpha- und Betateilchen aus und vermögen auf sehr kurzen Strecken eine hohe Anzahl von Ionen zu erzeugen.

Abb. 11.1.1
Äußere (A) und innere (B) Einwirkung von Alpha-, Beta- und Gammastrahlen

Gammastrahlen ausreichender Energie können bei äußerer und innerer Strahleneinwirkung praktisch alle Teile des Körpers erreichen (Abb. 11.1.1).

• Radioaktive Stoffe, die vom menschlichen Körper resorbiert worden sind, werden meist nicht gleichmäßig verteilt, sondern in einem oder in mehreren Organen gespeichert. Dabei kann es zu einer hohen Belastung einzelner Organe kommen.

Beispiel:
In den ersten Tagen nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl (Ende April, Anfang Mai 1986) befand sich in der Luft I–131. Es ist ein Beta- und Gammastrahler. Durch äußere Strahleneinwirkung kam es zu einer geringen, relativ gleichmäßigen Ganzkörperbestrahlung.

Durch Inkorporation von I–131 wurde aber im wesentlichen nur die Schilddrüse und die in ihrer Nähe liegenden Körperbereiche einer intensiveren Bestrahlung ausgesetzt.

Im folgenden werden am Beispiel des Kernkraftwerkes einige besonders wichtige Einrichtungen vorgestellt, durch die Spaltprodukte, Transurane und Aktivierungsprodukte in der Anlage selbst zurückgehalten werden, damit es nicht zu einer Inkorporation kommt. Ähnliche Einrichtungen werden auch in den anderen kerntechnischen Anlagen eingesetzt.

Für beruflich strahlenexponierte Personen sind äußere und innere Strahleneinwirkung von Bedeutung. Bei der übrigen Bevölkerung ist praktisch nur die innere Strahleneinwirkung wichtig, die durch Radionuklide in der Abluft und im Abwasser hervorgerufen wird.

11.1 Mehrfacheinschluß radioaktiver Stoffe

Damit die in einem Kernreaktor vorhandenen Radionuklide nicht ins Freie gelangen können, werden sie mehrfach eingeschlossen. Selbst wenn ein Einschluß undicht wird, bleiben die anderen wirksam.

Die in Abb. 10.5.1 dargestellten Abschirmungen gegen Direktstrahlung sind z. T. gleichzeitig Barrieren gegen das unkontrollierte Austreten von Radionukliden.

Natururan, die entstandenen Spaltprodukte sowie die Transurane werden primär in den Brennstäben eingeschlossen (Abb. 11.1.2). Leichtflüchtige und gasförmige Spaltprodukte (z. B. Xenon, Krypton, Jod) sammeln sich im Spaltgasraum oberhalb der UO_2-Pellets.

Den zweiten Einschluß bildet das Reaktordruckgefäß mit dem angeschlossenen Rohrsystem (Abb. 11.1.3).

Abb. 11.1.2
Schnitt durch einen Brennstab

Es ist ein dickwandiger Stahlbehälter mit einer Wandstärke von 20 bis 25 cm und einer Höhe von etwa 20 m. In seinem Innern befinden sich die etwa 40 000 bis 50 000 Brennstäbe, die Regelstäbe und das Kühlmittel.

Ein Sicherheitsbehälter aus Stahl umschließt das Reaktordruckgefäß und die unmittelbar daran anschließenden Teile des Kühlmittelkreislaufs (Abb. 11.1.4). Rohrleitungen, die aus dem Sicherheitsbehälter herausführen, können durch mehrfach angeordnete schnellschließende Ventile abgesperrt werden.

Abb. 11.1.3
Reaktordruckgefäß eines Druckwasserreaktors
(Bei einem Siedewasserreaktor wird das Druckgefäß im Reaktorgebäude aus einzelnen Ringelementen zusammengesetzt und kann deshalb nicht als Ganzes fotografiert werden.)

Der Sicherheitsbehälter als dritte Barriere ist so ausgelegt, daß auch bei einem Leck in einer Frischdampfleitung keine radioaktiven Stoffe ins Freie gelangen. Zusätzlich ist ein Druckabbausystem vorhanden. Bei einem Störfall austretender Dampf würde dann im Sicherheitsbehälter kondensieren.

Sicherheitsbehälter haben Durchmesser zwischen 25 und 30 m. Behälter solcher Größe können nicht absolut gasdicht hergestellt werden. Deshalb befindet sich in einigen cm Abstand von der Außenwand noch eine Dichthaut aus Stahl. Der Zwischenraum wird durch Absaugen ständig auf Unterdruck gehalten.

Abb. 11.1.4
Der fertige Sicherheitsbehälter eines Siedewasserreaktors wird in das Reaktorgebäude gefahren

11.2 Druckdifferenz als Sicherheitsbarriere

Bei der großen Anzahl von Brennstäben treten vereinzelt Undichtigkeiten auf. Man geht heute davon aus, daß jeder 10 000ste Brennstab feinste Haarrisse oder Poren aufweist, durch die vor allem gasförmige und leicht flüchtige Radionuklide in das umgebende Wasser gelangen.

Das Kühlmittel und die in ihm vorhandenen Stoffe werden durch die Neutronenstrahlung z.T. aktiviert und dadurch radiaktiv. Auf diese Weise entstehen z.B. Fe–59 und Co–60 (vgl. 9.3).

Durch kleinste Undichtigkeiten an verschiedenen Stellen des Kühlmittelkreises (z.B. bei Dichtungen von Pumpen, Ventilen oder von Durchführungen der Turbinenwelle) treten geringe Mengen radioaktiver Stoffe aus und befinden sich dann im Reaktorgebäude.

Damit die Spalt- und Aktivierungsprodukte das Reaktorgebäude auf keinen Fall unkontrolliert verlassen, werden verschiedene Unterdruckzonen eingerichtet. Da Luft immer von der Stelle mit höherem Druck zur Stelle mit niedrigerem Druck strömt, kann erreicht werden, daß bei normalem Betrieb Luft immer nur von weniger aktiven zu stärker aktiven Räumen strömt (also von außen nach innen) (Abb. 11.2.1).

Der Luftdruck im Reaktorgebäude ist etwa 1 hPa (1 mbar) geringer als außerhalb des Gebäudes. Im Ringspalt zwischen Sicherheitsbehälter und Dichthaut herrscht ein um 10 hPa (10 mbar) geringerer Druck. Im Sicherheitsbehälter selbst schwankt der Druck in Abhängigkeit von verschiedenen Betriebsbedingungen (Abb. 11.2.2).

Radioaktive Stoffe, die sich im Raktorgebäude befinden, gelangen mit der Luft in die Unterdruckzonen bzw. die Absaugvorrichtungen. Dort können sie kontrolliert weiterbehandelt werden. Bei Störungen in der Reaktoranlage ist es möglich, die Luft aus den Unterdruckzonen in den Sicherheitsbehälter zurückzupumpen. Personen- und Materialschleusen stellen darüber hinaus sicher, daß die Unterdruckzonen auch beim Begehen des Sicherheitsbehälters aufrechterhalten bleiben.

Abb. 11.2.1
Ein Medium strömt von der Stelle mit höherem Druck zur Stelle mit niedrigerem Druck

Abb. 11.2.2
Unterdruck im Reaktorgebäude und Ringspalt

Druckdifferenzen als Sicherheitsbarrieren sind auch noch an anderen Stellen eines Kernkraftwerkes vorhanden. Eine besonders wichtige Stelle ist der Kondensator, bei dem über einen Wärmetauscher Energie an die Umgebung abgegeben wird (Abb. 11.2.3).

Das Kühlwasser, das beispielsweise einem Fluß entnommen wird, steht unter einem Druck > 1000 hPa (> 1000 mbar), während im Kondensator ein Unterdruck von nur 40 hPa (40 mbar) herrscht. Bei einem angenommenen Riß im Wärmetauscher kann zwar Flußwasser in den Kondensator, aber niemals radioaktiver Dampf in das Flußwasser gelangen.

Abb. 11.2.3
Druckverhältnisse im Kondensator

11.3 Verringerung der Aktivität bei Abluft und Abwasser

Die in einem Kernkraftwerk entstehenden Radionuklide verbleiben zu mehr als 99 % in den Brennstäben. Sie werden erst bei der Wiederaufarbeitung behandelt.

Daneben fallen aber durch Leckagen und Neutronenaktivierung gasförmige, flüssige und feste Reaktorbetriebsabfälle an, die soweit wie möglich zurückgehalten werden.

Um die Radioaktivität der Abluft und des Abwassers zu verringern, gibt es zwei unterschiedliche Verfahren.

- Verzögerte Abgabe, damit die Radioaktivität von selbst abklingt.

- Abtrennen der Radionuklide durch physikalische sowie chemische Verfahren und Endlagerung dieser Radionuklide.

Behandlung gasförmiger Reaktorbetriebsabfälle

Einige der wichtigsten gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide, sie sich in der Luft des Kraftwerksgebäudes befinden, sind die durch Leckagen entwichenen Spaltprodukte Xe–133, Kr–85 und I–131.

Xe–133 hat nur eine Halbwertszeit von 5,25 d. Es wird in einer Verzögerungsstrecke bis zu 60 d zurückgehalten. Da dann mehr als 10 Halbwertszeiten verstrichen sind, ist die ursprüngliche Aktivität auf weniger als 0,1 % abgeklungen (Abb. 11.3.1).

$$^{133}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{133}_{55}\text{Cs} + ^{0}_{-1}\text{e} + \gamma$$

Abb. 11.3.1
Abklingen der Radioaktivität bei Xenon–133

Verzögerungsstrecken bestehen z. B. aus Aktivkohlefiltern. Das Gas wird zunächst in der ersten Filterschicht absorbiert (Gasmoleküle lagern sich an der Oberfläche von Kohlenstoffpartikeln an). Im Laufe der Zeit bewegen sie sich durch Austausch langsam durch die Kohlefilterstrecke bis zum Abluftkamin [53, S. 29].

Das Spaltprodukt Krypton–85 hat eine Halbwertszeit von 10,76 a. Da es als Edelgas keine chemischen Verbindungen eingeht und sich im Organismus nicht anreichert, besitzt es nur eine geringe Radiotoxizität. Es wird deshalb in genehmigten Mengen und unter laufender Kontrolle in die Atmosphäre geleitet. Der größte Teil des Kr–85 wird ohnehin erst bei der Aufarbeitung der Brennelemente frei und kann dann durch besondere Verfahren zurückgehalten werden.

Der Anteil des I–131 in der Gebäudeluft ist gering. Da dieses Element aber im Gegensatz zu den Edelgasen chemische Verbindungen eingehen kann und außerdem zu den physiologisch bedeutsamen Elementen gehört, wird es durch mehrere hintereinander angeordnete Absolutfilter zurückgehalten. Eine Rückhaltung zu mehr als 99,9 % wird dadurch erreicht, daß die Filter zusätzlich mit Silbernitrat getränkt sind. Bei Kontakt mit Jod entsteht dann Silberjodid, das in den Filtern verbleibt.

In ähnlicher Weise verfährt man mit den Aerosolen, bei denen sich radioaktive Teilchen an Staubpartikel oder Wassertröpfchen angelagert haben.

Behandlung flüssiger Reaktorbetriebsabfälle

Aus Undichtigkeiten des Kühlmittelkreises austretendes Wasser sowie Wasser aus Labors, Dekontaminationsanlagen und Waschräumen bilden die flüssigen Reaktorbetriebsabfälle. Auch bei der Abgabe von radioaktiven Flüssigkeiten an die Umgebung gilt, die Strahlenbelastung der Menschen durch innere Strahleneinwirkung so gering wie möglich zu halten.
Die wichtigste Maßnahme besteht darin, der Flüssigkeit die radioaktiven Stoffe zu entziehen. Das geschieht durch Eindampfen (Abdestillieren der Flüssigkeit), Ionenaustausch, Filtration oder chemische Fällung.

Eine Sonderstellung nimmt das Tritium (H–3) ein. Es entsteht bei einem geringen Prozentsatz der Kernspaltungen als drittes Teilchen und durch Neutronenbestrahlung des Kühlmittels sowie anderer Materialien.

Beispiele:

- $^{1}_{1}\text{H} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{2}_{1}\text{H} + \gamma$

  $^{2}_{1}\text{H} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{3}_{1}\text{H} + \gamma$

- $^{10}_{5}\text{B} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{3}_{1}\text{H} + 2\,^{4}_{2}\text{He}$

- $^{6}_{3}\text{Li} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{3}_{1}\text{H} + ^{4}_{2}\text{He}$

Das Tritium liegt im wesentlichen als HTO vor (Wassermolekül, dessen Wasserstoffatome die Isotope H–1 und H–3 = T sind). Wegen der relativ langen Halbwertszeit von 12,323 a können keine Verzögerungsstrecken eingesetzt werden.

Da die maximale Energie der vom Tritium ausgesandten Betateilchen aber nur 0,02 MeV beträgt und keine Gammaquanten auftreten, entsteht durch die Abgabe des Tritium an die Umgebung nur eine geringe zusätzliche Strahlenbelastung der Bevölkerung.
(Abgabewerte für Tritium siehe Tabelle 11.4.1 und 11.4.2.)

Behandlung fester Reaktorbetriebsabfälle

Radioaktive Reaktorbetriebsabfälle fallen in Form von Filtern, Ionenaustauschern, Putzlappen, kontaminierter Kleidung, Abfällen von Reparaturen u. ä. an. Sie werden in der Regel verbrannt oder verdichtet, um ihr Volumen zu verkleinern. Anschließend schließt man sie in Behältern sicher ein. Nach Zwischenlagerung im Kernkraftwerk ist für sie eine Endlagerung in einem Bergwerk vorgesehen. Der Einschluß in mehreren 100 m Tiefe garantiert, daß die Stoffe mit der Biosphäre nicht mehr in Berührung kommen.

Beim Betrieb eines 1300-MWe-Kernkraftwerkes fallen jährlich folgende Mengen radioaktiver Abfälle an (Mengenangabe vor der Verdichtung):

235 m^3 Verdampfer- und Filterkonzentrate

120 m^3 Putzwolle, Papier, kontaminierte Kleidung

8 m^3 Filtereinsätze der Abluft- und Abgasreinigung.

[39, S. 1]

*) Rekombination: Katalytische Reaktion $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Abb. 11.3.2
Aktivitätsflußschema eines Kernkraftwerkes (Brunsbüttel)

11.4 Kontrollierte Abgabe radioaktiver Stoffe

Bei der Freisetzung von Radionukliden mit Abluft und Abwasser unterscheidet man zwischen Genehmigungswerten und Abgabewerten.

Die Genehmigungswerte legt die Aufsichtsbehörde fest. Sie dürfen auch unter ungünstigsten Verhältnissen nicht überschritten werden. Mit ihnen wird die mögliche Strahlenbelastung der Bevölkerung in der Nähe eines Kernkraftwerkes berechnet.

Der Genehmigungswert ergibt sich aus Betriebserfahrungen bei anderen Kernkraftwerken und aufgrund von Berechnungen für die neue Anlage. – Die tatsächlichen Abgabewerte, die während des Betriebes ermittelt werden, ergeben meist nur wenige Prozent der Genehmigungswerte.

Welche Mengen radioaktiver Stoffe letztlich an die Umgebung abgegeben werden, ist vom Reaktortyp, der Reaktorleistung und der Betriebsweise abhängig.

In den Tabellen 11.4.1 und 11.4.2 sind die Genehmigungswerte und die tatsächlichen Abgabewerte eines Siedewasserreaktors (SWR) und eines Druckwasserreaktors (DWR) einander gegenübergestellt. Die Pfade Abluft und Abwasser sind separat ausgewiesen.

Die gasförmigen und leichtflüchtigen Radionuklide gelangen kontrolliert über den Abluftkamin ins Freie und werden auf ein großes Luftvolumen verteilt. Welche Radionuklidkonzentration am Boden auftritt, hängt von mehreren Faktoren ab: freigesetzte Menge, Höhe des Abluftkamins, Entfernung zum Kraftwerk, Wetterbedingungen und Art der Ablagerung (trockene oder nasse Ablagerung). Das Konzentrationsmaximum der Ablagerung auf dem Boden liegt etwa 1 bis 2 km in Hauptwindrichtung vom Kernkraftwerk entfernt. Dort ist auch die Strahlenbelastung am größten. Sie darf jedoch die Maximalwerte, die die Strahlenschutzverordnung festlegt, nicht überschreiten (vgl. Tabelle 12.2.1) [54, S. 11ff.].

Abwässer werden in großen Behältern gesammelt und die Gesamtaktivität sowie die Aktivität einzelner Radionuklide bestimmt. Wenn die spezifische Aktivität bestimmte Werte nicht überschreitet, wird der Abfluß freigegeben. Bei Überschreiten der zulässigen Werte schließt sich der Abfluß automatisch.

Beim Druckwasserreaktor wird der erhöhte Tritiumgehalt durch Borsäure verursacht, die dem Kühlmittel des Reaktors zur Langzeitregelung zugesetzt ist.

Bildungsreaktionen:

$^{10}_{5}\mathrm{B}\ (n,2\alpha)\ ^{3}_{1}\mathrm{H}$ (mit schnellen Neutronen)

$^{10}_{5}\mathrm{B}\ (n,\alpha)\ ^{7}_{3}\mathrm{Li}\ (n,\alpha+n)\ ^{3}_{1}\mathrm{H}$ (mit thermischen Neutronen)

Die Radionuklidkonzentration, die im Flußwasser auftritt, ist von der abgegebenen Radionuklidmenge, der Wasserführung des Flusses, der Fließgeschwindigkeit sowie von Sedimentationsvorgängen abhängig.

Radionuklid-gruppe	Genehmigungs-wert in Bq / a	Abgabewert in Bq / a	Abgabewert in Prozent des Genehmigungs-wertes
Abluft:			
rad. Gase (Edelgase, H-3, C-14, ohne I-131)	$1{,}48 \cdot 10^{15}$	$1{,}21 \cdot 10^{12}$ z.B.: Kr-85: $1{,}37 \cdot 10^{11}$ Xe-133: $7{,}25 \cdot 10^{11}$	0,082
radioaktive Aerosole (z. B. Co-60, Mn-54, ohne I-131)	$1{,}48 \cdot 10^{10}$	$5{,}45 \cdot 10^{6}$ z.B.: Cr-51: $5{,}36 \cdot 10^{5}$ Mn-54: $1{,}84 \cdot 10^{5}$ Co-60: $3{,}52 \cdot 10^{6}$ Ba-140: $1{,}50 \cdot 10^{10}$ I-133: $7{,}85 \cdot 10^{8}$	0,037
Iod-131	$9{,}6 \cdot 10^{9}$	$8{,}0 \cdot 10^{7}$	0,833
Abwasser:			
Tritium	$1{,}85 \cdot 10^{13}$	$6{,}9 \cdot 10^{11}$	3,730
sonstige Radionuklide	$5{,}0 \cdot 10^{10}$	$2{,}22 \cdot 10^{7}$ z.B.: Co-60: $1{,}46 \cdot 10^{7}$ Mn-54: $3{,}90 \cdot 10^{6}$ Zn-65: $1{,}70 \cdot 10^{6}$ Cs-137: $1{,}68 \cdot 10^{6}$ Sr-90: $< 7 \cdot 10^{2}$	0,044

Tabelle 11.4.1
Genehmigungs- und Abgabewerte eines Siedewasserreaktors (Krümmel, W_{el} = 1316 MW, 1989)

Radionuklid-gruppe	Genehmigungs-wert in Bq / a	Abgabewert in Bq / a	Abgabewert in Prozent des Genehmigungs-wertes
Abluft:			
radioaktive Gase (ohne I-131)	$1 \cdot 10^{15}$	$1{,}09 \cdot 10^{12}$ z.B.: Xe-133: $1{,}62 \cdot 10^{11}$ Ar-41: $1{,}07 \cdot 10^{11}$ Kr-85m: $4{,}5 \cdot 10^{9}$ Xe-133m: $3{,}2 \cdot 10^{9}$	0,109
radioaktive Aerosole (ohne I-131)	$1 \cdot 10^{10}$	$4{,}75 \cdot 10^{4}$ z.B.: Co-58: $1{,}33 \cdot 10^{4}$ Co-60: $3{,}42 \cdot 10^{4}$	0,0005
Iod-131	$6 \cdot 10^{9}$	< Nachweisgrenze	< Nachweis-grenze
Abwasser:			
Tritium	$3{,}5 \cdot 10^{13}$	$1{,}34 \cdot 10^{13}$	38,286
sonstige Radionuklide	$5{,}55 \cdot 10^{10}$	< Nachweisgrenze	< Nachweis-grenze

Tabelle 11.4.2
Genehmigungs- und Abgabewerte eines Druckwasserreaktors (Brokdorf, W_{el} = 1365 MW, 1989)

11.5 Umgebungsüberwachung

Jeder Betreiber eines Kernkraftwerkes (oder einer anderen kerntechnischen Anlage) ist verpflichtet, in der Umgebung Überwachungsmessungen durchzuführen. Die Meßwerte werden von der Überwachungsbehörde nachgeprüft und teilweise durch eigene Messungen ergänzt.

Durch die Umgebungsüberwachung wird die Radionuklidkonzentration in Luft, Wasser, auf dem Boden und in den Nahrungsketten ermittelt. Dabei beginnt man bereits zwei Jahre vor Inbetriebnahme des Kernkraftwerkes, um geeignete Vergleichswerte zu besitzen.

Abb. 11.5.1 zeigt beispielhaft das Meßnetz für eine Umgebungsüberwachung, und Tabelle 11.5.1 gibt die Art, Anzahl und Häufigkeit der Probenentnahmen an.

Art	Entfernung	Anzahl	Häufigkeit
Luft	bis 50 km	10	wöchentlich
Milch	bis 4 km	4	monatlich
Honig	bis 2 km	1	jährlich
Weizen	bis 4 km	2	jährlich
Boden	bis 10 km	10	jährlich
Pflanzen	bis 10 km	4	jährlich
Wasser	bis 30 km	20	2tägig bis monatlich

Tabelle 11.5.1
Art, Anzahl und Häufigkeit der Probeentnahmen zur Umgebungsüberwachung [54, S. 29]

Die Strahlenbelastung aufgrund der abgegebenen radioaktiven Stoffe ist nicht direkt meßbar, da sie in den Schwankungen der natürlichen Strahlenbelastung untergeht. Mögliche Belastungswerte lassen sich nur mit Hilfe von Rechenmodellen ermitteln. Sie liegen in der Nähe von Kernkraftwerken und Anlagen zur Brennelementherstellung bzw. zur Wiederaufarbeitung bei < 0,01 mSv / a (< 1 mrem / a). Sie betragen also weniger als 1 % der natürlichen Strahlenbelastung.

11.6 Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr

Der Mensch nimmt mit der Atemluft, dem Wasser und der Nahrung natürliche und künstlich erzeugte Radionuklide auf.

Damit die Gesundheit der Menschen nicht gefährdet wird, hat die Strahlenschutzverordnung Grenzwerte festgelegt. Sie geben an, welche Mengen eines Radionuklides pro Jahr von einer Person gefahrenlos inkorporiert werden können.

Dabei wird zwischen der Stoffaufnahme mit der Atemluft (Inhalation) und mit Wasser bzw. Nahrungsmitteln (Ingestion) unterschieden.

Die Menge (Masse) eines Stoffes wird üblicherweise in Gramm angegeben. Da bei jedem Radionuklid eine bestimmte Masse auch eine bestimmte Aktivität besitzt, sind die Grenzwerte statt in Gramm in der Einheit Bq / a festgelegt worden.

Abb. 11.5.1
Meßnetz zur Umgebungsüberwachung des Kernkraftwerks Krümmel bei Hamburg [54, S. 29]

Beispiel:

Für Cs–137 gelten die Grenzwerte $6 \cdot 10^6$ Bq / a (Inhalation) und $4 \cdot 10^6$ Bq / a (Ingestion).

Diese Angaben sagen folgendes aus:

1 g Cs–137 hat eine Aktivität von $3{,}2 \cdot 10^{12}$ Bq (spezifische Aktivität, vgl. 5.5).

10^{-6} g = 1 µg hätte dann eine Aktivität von $3{,}2 \cdot 10^6$ Bq.

Das ist etwa der Grenzwert für die Ingestion. Eine beruflich strahlenexponierte Person darf also pro Jahr etwas mehr als 1 µg Cs–137 mit Wasser oder Nahrungsmitteln inkorporieren, und diese Radionuklidmenge hätte dann eine Aktivität von $4 \cdot 10^6$ Bq. Man sagt deshalb vereinfachend: Der Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr durch Ingestion ist $4 \cdot 10^6$ Bq.

Tabelle 11.6.1 gibt für einige Radionuklide die Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A an. Für die Bevökerung gelten 3/500 dieser Werte.

Radionuklid	Grenzwerte der Jahresaktivitätszufuhr in Bq / a über	
	Luft	Wasser und Nahrung
$^{3}_{1}$H	$3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$ *)
$^{14}_{6}$C	$9 \cdot 10^7$ *)	$9 \cdot 10^7$
$^{60}_{27}$Co	$4 \cdot 10^5$ *)	$7 \cdot 10^6$
$^{90}_{38}$Sr	$5 \cdot 10^4$ *)	$3 \cdot 10^5$ *)
$^{123}_{53}$I	$1 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^7$
$^{131}_{53}$I	$1 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^5$
$^{134}_{55}$Cs	$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
$^{137}_{55}$Cs	$6 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$
$^{210}_{82}$Pb	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^4$
$^{210}_{84}$Po	$7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$
$^{222}_{86}$Rn	$2 \cdot 10^8$ ($4 \cdot 10^6$)**)	–
$^{226}_{88}$Ra	$9 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$
$^{nat}_{90}$Th	$1 \cdot 10^2$ *)	$3 \cdot 10^4$
$^{nat}_{92}$U	$5 \cdot 10^2$ *)	$3 \cdot 10^5$ *)
$^{239}_{94}$Pu	$1 \cdot 10^2$ *)	$2 \cdot 10^4$ *)
beliebiges Radionuklidgemisch	$5 \cdot 10^0$	$5 \cdot 10^2$

*) Für besondere Gruppen chemischer Verbindungen gelten höhere Grenzwerte

**) Der niedrigere Wert gilt für den Fall des Gleichgewichts mit den Zerfallsprodukten.

Tabelle 11.6.1
Grenzwerte für die Jahresaktivitätszufuhr [65, S. 95ff.]

Beispielrechnung für die Bevölkerung:
In Nordskandinavien wurde 1987 in einzelnen Proben von Rentierfleisch eine spezifische Cs–137-Aktivität von

mit Luft
$6 \cdot 10^6$ Bq / a
mit Nahrung und Trinkwasser
$4 \cdot 10^6$ Bq / a

Abb. 11.6.1
Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr von Cs–137 (beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A)

mit Luft
$5 \cdot 10^4$ Bq / a
mit Nahrung u. Trinkwasser
$3 \cdot 10^5$ Bq / a

Abb. 11.6.2
Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr von Sr–90 (beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A)

10 000 Bq / kg gemessen. Der mittlere Fleischverbrauch des Standardmenschen beträgt 75 kg.

Wäre der Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr erreicht worden, wenn sich eine Person ausschließlich von diesem Fleisch ernährt hätte?

$A_{sp.} = 10^4$ Bq / kg = $7{,}5 \cdot 10^5$ Bq / 75 kg.

Der Grenzwert für die Ingestion liegt für die Bevölkerung bei $A_{gr} = 4 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-3}$ Bq / a = $2{,}4 \cdot 10^4$ Bq / a.

Der Grenzwert für die Bevölkerung würde also überschritten.

Dabei ist zu bedenken, daß die Grenzwerte aufgrund der z. Z. vorliegenden strahlenbiologischen Erkenntnisse festgelegt worden sind.

Die Grenzwerte für die Jahresaktivitätszufuhr sind den meisten Menschen in der Bundesrepublik nicht geläufig. Ihre Anwendung erfordert außerdem die Durchführung von Rechnungen, was ihre Anwendung im täglichen Gebrauch nicht gerade erleichtert. Zur Vereinfachung hat man deshalb nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl Grenzwerte für Nahrungsmittel vorgeschlagen. Sie sind z. Z. nur noch für das Radionuklid Cs–137 wichtig, da es als einziges Radionuklid in den kommenden Jahren von Bedeutung sein wird (Tabelle 11.6.2).

Nahrungsmittelgruppe	Grenzwert der spezifischen Aktivität
Milch	370 Bq / kg
alle übrigen Nahrungsmittel	600 Bq / kg

Tabelle 11.6.2
EG-Grenzwerte für die spezifische Cs–137-Aktivität von Nahrungsmitteln

11.7 Verzehreinschränkungen

Unmittelbar nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl enthielten einige Nahrungsmittel relativ hohe Radionuklidkonzentrationen. Auch noch Jahre später traten sie bei bestimmten Produkten auf (z. B. Ernte und Konservierung unmittelbar nach dem Unfall oder Herkunft aus hochbelasteten Regionen Europas).

Durch geschickte Auswahl der Nahrungsmittel war und ist es möglich, die innere Strahleneinwirkung durch künstlich erzeugte Radionuklide sehr niedrig zu halten. Dafür ist es jedoch erforderlich, die regelmäßigen Veröffentlichungen der Gesundheitsbehörden bzw. der dafür zuständigen Ministerien zu lesen. Die Abbildungen 11.7.1 und 11.7.2 geben zwei Speisepläne wieder, die im Februar 1988 von der Gesundheitsbehörde in Hamburg veröffentlicht worden sind.

Daraus wird deutlich, daß durch Verzicht auf hochbelastete Nahrungsmittel die Aktivität der inkorporierten künstlichen Radionuklide auf sehr niedrige Werte herabgesetzt werden kann.

Wie hoch die innere Strahlenbelastung des Menschen wird, ist aber nicht nur von der Radionuklidkonzentration der Nahrungsmittel, sondern auch von der Verzehrmenge abhängig.

Menge	Nahrungsmittel	Aktivität in Bq	
1. Frühstück			
120 g	Mischbrot	2,0	
25 g	Camembert	0,9	
25 g	Corned Beef (Jugoslawien)	1,2	
20 g	Nuß-Nougat-Creme	3,2	
125 ml	schwarzer Tee (Türkei)	6,5	(nicht verkehrsfähig)
		13,8	
2. Frühstück			
100 g	Quark	0,2	
25 g	Blaubeeren	2,4	
		2,6	
Mittagessen			
150 g	Wildfleisch (Niedersachsen)	87,2	
60 g	Nudeln, gekocht	0,6	
200 g	Maronen (Niedersachsen)	210,6	(nicht verkehrsfähig)
20 g	Pfirsiche (Konser. / Griechenl.)	1,0	
10 g	Preisselbeermus (Skandinav.)	0,0	
150 g	Vanilleeis	3,0	
50 g	Kirschen	16,7	
		319,1	
Vesper			
20 g	Nußschokolade	1,7	
125 ml	Kaffee	0,0	
5 g	Kondensmilch	0,3	
		2,0	
Abendessen			
80 g	Roggenvollkornbrot (Ernte A)	2,7	
5 g	Butter	0,0	
Schafskäsesalat:			
50 g	bulgarischer Schafskäse	8,3	
150 g	Paprika / Tomate (Nordd.)	0,0	
200 ml	schwarzer Tee (Türkei)*	10,5	(nicht verkehrsfähig)
		21,5	
Gesamtbelastung		**359,0**	

* Berechnung erfolgte unter der Annahme, daß durch die Zubereitung der Cäsiumgehalt um 25 % gesenkt wird und 10 g Tee pro Liter trinkfertiger Zubereitung benutzt werden [15, S. 33].

Abb. 11.7.1 Mit Radionukliden stark belasteter Speiseplan
(Die Daten wurden einem Vorschlag der Gesundheitsbehörde Hamburg/Februar 1988 entnommen) [15, S. 33]

Beispiel:
1987 lag in Hamburg die spezifische Cs-Aktivität von Rindfleisch im Mittel bei 19 Bq / kg. Hätte eine Person seinen gesamten Fleisch- und Wurstkonsum von 75 kg / a damit abgedeckt, wären 1425 Bq dem Körper zugeführt worden.

Im gleichen Jahr war getrockneter Salbei aus der Türkei mit 400 Bq / kg belastet.

Da aber jeder Bundesbürger im Mittel nur 1 g getrocknete Kräuter pro Tag verbraucht, hätte (bei Verwendung nur dieser Salbeisorte) die Aktivitätszufuhr in diesem Jahr 146 Bq betragen.

Dieses Beispiel zeigt, daß die höhere spezifische Aktivität von Salbei durch die geringere Verzehrmenge letztlich zu einer geringeren Belastung des Körpers führt.

Die Aktivität der Lebensmittel kann zusätzlich durch die Art ihrer Zubereitung verringert werden. So geht z. B. beim Kochen von Wildpilzen in Salzwasser der Radioaktivitätsgehalt um 36 % bis 63 % zurück, wenn das Kochwasser weggegossen wird. – Bei Tee vermindert sich die Radioaktivität um bis zu 50 %, da ein Großteil der Radionuklide in den Teeblättern zurückbleibt. – Wird Wildfleisch 2 Tage in eine Essigbeize eingelegt und die Beize später weggegossen, vermindert sich der Radioaktivitätsgehalt um etwa 44 % [15, S. 35ff.].

1. Frühstück	**Aktivität in Bq**
150 ml Vollmilch	0,4
50 g Gerstenflocken	0,2
50 g Banane	0,0
50 g Birne	0,2
20 g Roggenvollkornbrot (Ernte B)	0,1
20 g Kräuterfrischkäse	0,1
125 ml Pfefferminztee	0,2
	1,2
2. Frühstück	
1 Apfel (Norddeutschland)	0,0
Mittagessen	
Zucchini-Weizen-Auflauf:	
50 g Weizen (ganz)	0,2
200 g Zucchini	0,0
1 Ei	0,0
20 ml Milch	0,1
Möhrenrohkost:	
150 g Möhren (Norddeutschland)	0,5
1 EL Zitronensaft	0,0
Quarkspeise:	
100 g Quark	0,2
50 g Erdbeeren (tiefgefroren)	0,2
	1,2
Vesper	
125 ml Mineralwasser	0,0
50 g Vollkornkekse	0,8
	0,8
Abendessen	
80 g Weizenschrotbaguette	0,2
5 g Butter	0,0
Käsesalat:	
50 g Käse (dän. Gouda)	0,2
150 g Paprika / Tomate	0,0
200 ml schwarzer Tee aus Ceylon	0,0
	0,4
Gesamtbelastung:	**3,6**

Abb. 11.7.2 Mit Radionukliden wenig belasteter Speiseplan
(Die Daten wurden einem Vorschlag der Gesundheitsbehörde Hamburg/Februar 1988 entnommen) [15, S. 32]

12 Personenschutz in einem Kernkraftwerk

12.1 Dosisgrenzwerte

Ein Kernreaktor ist die größte von Menschen hergestellte Quelle für ionisierende Strahlen. Sie entstehen im wesentlichen bei den Kernspaltungen und beim weiteren Zerfall der radioaktiven Spaltprodukte.

Die Strahlung bildet eine Gefahr für Personen, die in einem Kernkraftwerk tätig sind. Zu ihrem Schutz hat man deshalb Dosisgrenzwerte festgelegt, die im Normalfall nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte schließen die natürliche und die medizinische Strahlenbelastung nicht ein.

Körperbereich	Grenzwerte der Teilkörperdosen für beruflich strahlenexponierte Personen in mSv / a	(mrem / a)
1. Effektive Dosis, Teilkörperdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50	5 000
2. Teilkörperdosis: Alle Organe und Gewebe, soweit nicht unter 1, 3 oder 4 genannt	150	15 000
3. Teilkörperdosis: Schilddrüse, Knochenoberfläche, Haut (soweit nicht unter 4 genannt)	300	30 000
4. Teilkörperdosis: Hände, Unterarme, Füße, Unterschenkel, Knöchel (einschließlich der dazugehörigen Haut)	500	50 000

Tabelle 12.1.1
Dosisgrenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen der Kategorie A [65, S. 114]

Der Strahlenschutz unterscheidet zwischen beruflich strahlenexponierten Personen und der übrigen Bevölkerung. Als beruflich strahlenexponiert gelten alle Personen, die bei ihrer Berufsausübung mehr als 1/10 der in Tabelle 12.1.1 angegebenen Dosen erhalten können.

Die Betreiber von Kernkraftwerken haben von sich aus niedrigere Werte als sogenannte Interventionswerte festgelegt. Werden sie überschritten, können zusätzliche Strahlenschutzmaßnahmen geplant werden, um in jedem Fall unter den gesetzlichen Grenzwerten zu bleiben.

Keimdrüsen und rotes Knochenmark gehören zu den strahlenempfindlichsten Organen des Menschen. Der Grenzwert von 50 mSv / a (5000 mrem / a) ist deshalb so festgelegt worden, daß ein ausreichender Sicherheitsabstand zu den Strahlendosen besteht, bei denen ein erster Bestrahlungseffekt medizinisch nachweisbar ist ($H > 250$ mSv bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung). Die Grenzwerte sind als Basiswerte aufzufassen, von denen jedoch unter bestimmten Voraussetzungen abgewichen wird.

Erforderliche Herabsetzung der Grenzwerte: Bei Personen unter 18 Jahren; gebärfähigen Frauen; Personengruppen mit eingeschränktem Wirkungsbereich; Personen, bei denen bereits ein einzelner Grenzwert überschritten wurde; Personen, die in zu kurzer Zeit einen Teil des Dosisgrenzwertes erreicht haben.

Mögliche Erhöhung der Grenzwerte: Sollen Störfallfolgen oder die Gefährdung von Personen beseitigt werden, ist eine Überschreitung der Grenzwerte zulässig. Sie dürfen dann im Kalenderjahr bis zum Zweifachen, im Laufe des Lebens bis zum Fünffachen betragen. Diese erhöhte Strahlenbelastung darf jedoch nicht gebärfähigen Frauen, Personen unter 18 Jahren oder Personen mit bereits erhaltener erhöhter Strahlendosis zugemutet werden.

12.2 Strahlenschutzbereiche

Die Strahlendosis, die eine Person bei der Arbeit in einem Kernkraftwerk erhält, ist vom Aufenthaltsort und der Arbeitszeit abhängig. Geht man bei zwei Personen A und B von gleichen Zeiten aus (z. B. zwei Stunden), kann Person A an einem Arbeitsplatz mit intensiverer Strahleneinwirkung eine höhere Dosis erhalten als Person B.

Je nach möglicher Ortsdosisleistung (in mSv / h) sind bei einem Kernkraftwerk vier Strahlenschutzbereiche festgelegt worden: Sperrbereich, Kontrollbereich, Überwachungsbereich und Umgebung (Abb. 12.2.1).

- Der Sperrbereich umfaßt alle Räume eines Kernkraftwerkes, in denen die Ortsdosisleistung höher als 3 mSv / h sein kann (§ 57 StSchV von 1989).

Der Aufenthalt im Sperrbereich ist Personen grundsätzlich verboten. Er muß deshalb mit einem Schild deutlich gekennzeichnet werden (Abb. 12.2.2). Der Zutritt wird nur erlaubt, wenn Arbeiten aus zwingenden betrieblichen Gründen ausgeführt werden müssen und andere Möglichkeiten nicht gegeben sind. Dann sind aber zusätzliche Personenschutzmaßnahmen erforderlich.

Beispiel:
Bei einem Siedewasserreaktor ist der Dampf, mit dem die Turbine betrieben wird, radioaktiv (Neutronenaktivierung von Sauerstoff–18). Zur Abschirmung der direkten Gammastrahlung ist die Turbine durch Betonwände umkleidet. Der Raum hinter der Betonabschirmung gehört zum Sperrbereich.

• Ein zweiter Strahlenschutzbereich ist der Kontrollbereich. Personen, die dort tätig sind, können durch äußere oder innere Strahleneinwirkung mehr als $^{3}/_{10}$ der angegebenen Grenzwerte erhalten (bei einem Aufenthalt von 40 Stunden pro Woche und 50 Wochen im Kalenderjahr) [§ 58 StSchV von 1989]. Auch der Kontrollbereich wird durch ein deutlich sichtbares Schild gekennzeichnet.

Er darf nur betreten werden, wenn es zur Aufrechterhaltung des Kraftwerkbetriebes erforderlich ist oder der Aufenthalt der Ausbildung dient.

Beispiel:
Beim Brennelementwechsel wird das Reaktordruckgefäß geöffnet und der Raum oberhalb des Druckgefäßes geflutet. Das Bedienungspersonal der Brennelementwechselmaschine befindet sich dann im Kontrollbereich (Abb. 12.4.6).

• Beim Überwachungsbereich unterscheidet man zwischen dem betrieblichen und dem außerbetrieblichen Bereich. Betriebliche Überwachungsbereiche sind die Bereiche, in denen Personen bei dauerndem Aufenthalt mehr als $^{1}/_{10}$ der Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen erhalten können [§ 60 StSchV von 1989].

Das Personal in der Schaltwarte befindet sich im betrieblichen Überwachungsbereich. Der außerbetriebliche Überwachungsbereich schließt an den betrieblichen Überwachungsbereich an und erstreckt sich bis zur Grundstücksgrenze.

Personen, die sich dauernd in diesem Bereich aufhalten, können durch Direktstrahlung oder durch radioaktive Ableitungen im Kalenderjahr höhere Dosen als 0,3 mSv (eff. Dosis) erhalten [§§ 44 u. 45 StSchV von 1989].

Für Menschen, die außerhalb der Strahlenschutzbereiche leben oder arbeiten, darf die effektive Körperdosis den Wert von 0,3 mSv / a nicht überschreiten (Tabelle 12.2.1).

Sperrbereich
Kein Zutritt
Vorsicht Strahlung

Abb. 12.2.2
Strahlenwarnzeichen

Umgebung $H < 0{,}3$ mSv / a
außerbetrieblicher Überwachungsbereich $H > 0{,}3$ mSv / a
betrieblicher Überwachungsbereich $H > \frac{1}{10} \cdot$ DG / a
Kontrollbereich $H > \frac{3}{10} \cdot$ DG / a
Sperrbereich
$H > 3$ mSv / h

Abb. 12.2.1
Strahlenschutzbereiche (DG: Dosisgrenzwerte, vgl. Tabelle 12.1.1)

Körperbereich	Grenzwerte für die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen (für jeden der Pfade Luft/Wasser) in	
	mSv / a	(mrem / a)
1. Effektive Dosis, Teilkörperdosis: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	0,3	30
2. Teilkörperdosis: Alle Organe und Gewebe, soweit nicht unter 1 oder 3 genannt	0,9	90
3. Teilkörperdosis: Knochenoberfläche, Haut	1,8	180

Tabelle 12.2.1
Dosisgrenzwerte für Bereiche, die nicht Strahlenschutzbereiche sind (§ 45 StSchV von 1989)

Der Grenzwert für Keimdrüsen, Gebärmutter und rotes Knochenmark von 0,3 mSv / a ist gleichzeitig auch der Grenzwert für die effektive Dosis.

Die Festlegung dieses Wertes beruht auf der Feststellung, daß die Schwankung der natürlichen Strahlenbelastung für die Mehrzahl der Bewohner der Bundesrepublik Deutschland im Mittel etwa 0,3 mSv / a beträgt.

Unbeteiligten Personen außerhalb kerntechnischer Anlagen wird also nicht mehr zugemutet, als an Schwankungen in der Natur ohnehin auftritt.

Die Grenzwerte für die Bevölkerung sind nicht als voll ausschöpfbare Werte aufzufassen. Die Betreiber von kerntechnischen Anlagen müssen alle vertretbaren technischen Möglichkeiten nutzen, um die Belastungswerte so gering wie möglich zu halten.

Selbst im ungünstigsten Störfall darf von Unbeteiligten der Grenzwert von 50 mSv (5 000 mrem) nicht überschritten werden, der im Normalfall auch für strahlenexponierte Personen gilt.

Die Teilkörperdosis für die Schilddrüse ist dann aber auf 150 mSv (15 000 mrem) festgelegt.

12.3 Kontrolle der Strahlenbelastungen

In der Bundesrepublik Deutschland sind zur Zeit (Stand 1988) etwa 285 000 Beschäftigte strahlenexponierte Personen. Sie arbeiten in der Medizin, der Forschung, der Industrie und in kerntechnischen Anlagen.

Etwa zwei Drittel dieser Personengruppe sind in der Medizin sowie medizinischen Hilfsberufen tätig. In Kernkraftwerken sind es rund 10 % [10, S. 24].

Damit für diesen Personenkreis die Dosisgrenzwerte nicht überschritten werden, sind umfangreiche Überwachungsmaßnahmen erforderlich.

Bei einer äußeren Strahleneinwirkung stehen folgende physikalische Kontrollen zur Verfügung:

– Aus den Eigenschaften der jeweiligen Strahlenquelle wird die Körperdosis abgeschätzt (z.B. Rollreifenfaß mit radioaktivem Abfall, Frischdampfleitung mit radioaktivem Dampf).

– An bestimmten Stellen der kerntechnischen Anlage mißt man mit Dosisleistungsmeßgeräten die Ortsdosisleistung (Warnung des Personals bei Überschreitung der zulässigen Ortsdosisleistung).

– Es wird die Personendosis mit Hilfe von Personendosimetern gemessen. Sie sagen etwas über die individuelle Belastung einer strahlenexponierten Person aus. Dafür werden in der Regel Filmdosimeter, Stabdosimeter oder Zählrohr-Dosimeter verwendet (vgl. Kap. 5).

Um die innere Strahleneinwirkung auf den Menschen zu überwachen, werden andere Verfahren angewandt:

– Bestimmung der Konzentration radioaktiver Stoffe in der Luft.

– Prüfung der Kontamination (Verunreinigung) der Haut, der Kleidung oder des Arbeitsplatzes.

– Messung der Körperaktivität der zu überwachenden Person mit einem Ganzkörperzähler (Abb. 12.3.1).

– Bestimmung der Aktivität in den Ausscheidungsprodukten.

Für beruflich strahlenexponierte Personen werden außerdem jährlich ärztliche Untersuchungen durchgeführt und die während eines Jahres erhaltenen Einzeldosen in einem Strahlenpaß festgehalten. Er gibt dann Auskunft über die bereits stattgefundenen Einwirkungen, so daß bei Näherung an die Grenzwerte weitere Belastungen ausgeschlossen werden können.

Abb. 12.3.1
Ganzkörperzähler

12.4 Schutzmaßnahmen bei Arbeiten im Kontrollbereich

Eine regelmäßig wiederkehrende Arbeit im Kontrollbereich eines Kernkraftwerkes ist z. B. der Austausch von Brennelementen. Dazu wird der Reaktor durch Einfahren der Regelstäbe abgeschaltet und anschließend das Reaktordruckgefäß geöffnet.

Zum Schutz vor Direktstrahlung aus dem Reaktor und zur Kühlung flutet man den Raum oberhalb des Reaktordruckgefäßes, so daß die abgebrannten Brennelemente unter Wasser entnommen und in ein seitlich angeordnetes und mit Wasser befülltes Lagerbecken transportiert werden können.

Den Transport der Brennelemente übernimmt eine Brennelementwechselmaschine, die von einem Facharbeiter bedient wird. Er gehört zu den beruflich strahlenexponierten Personen, die im Kontrollbereich tätig sind.
Die Schutzmaßnahmen, die bei der Tätigkeit eines Mitarbeiters im Kontrollbereich angewandt werden, lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- Maßnahmen zum Schutz des Mitarbeiters.

- Maßnahmen, um ein Verschleppen radioaktiver Stoffe nach draußen zu verhindern.

Jede Schutzmaßnahme wird mehrfach realisiert, um ihre Wirksamkeit zu erhöhen.

Die Abb. 12.4.1 beschreibt in vereinfachter Form den Weg in den Kontrollbereich bis zur Brennelementwechselmaschine und gibt die jeweiligen Strahlenschutzmaßnahmen an.

Abb. 12.4.1
Strahlenschutzmaßnahmen bei einer Arbeit im Kontrollbereich.

(* Dosimeter, das nach dem Geiger-Müller-Prinzip arbeitet)

1. Eine ärztliche Untersuchung stellt grundsätzlich fest, ob ein Mitarbeiter für den Einsatz im Kontrollbereich geeignet ist. Die Untersuchungen werden jährlich wiederholt.

2. Die zukünftig im Kontrollbereich Tätigen werden jährlich einmal in die Grundzüge der Betriebskunde sowie des Arbeits- und Brandschutzes eingeführt. Die Strahlenschutzbelehrung wird halbjährlich wiederholt.

3. Im Zuge der Arbeitsvorbereitung werden der Arbeitsablauf geplant, die erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen festgelegt und zum Schluß der Arbeitsauftrag erteilt. Nach Freigabe der Arbeit durch den Schichtleiter kann der Kontrollbereich betreten und mit der Arbeit begonnen werden.

4. In einem Umkleideraum außerhalb des Kontrollbereichs wird die Kleidung bis auf die Unterwäsche ausgezogen und ein Kittel sowie ein Paar Badesandalen angezogen (Abb. 12.4.2).

Abb. 12.4.2
Mitarbeiter mit Kittel und Badesandalen

5. Vor dem Kontrollbereichseingang erhält der Mitarbeiter zwei Dosimeter: ein Filmdosimeter zur monatlichen amtlichen Auswertung und ein Digitaldosimeter zur werksinternen Dosiskontrolle (geeignet zur Selbstablesung und mit einer akustischen Dosisleistungswarnschwelle versehen). Das zuletzt genannte Dosimeter wird vor dem Betreten des Kontrollbereichs durch einen Rechner auf Null gesetzt und dem jeweiligen Mitarbeiter zugeordnet (Abb.12.4.3 und 12.4.4).

Abb. 12.4.3
Filmdosimeter

Abb. 12.4.4
Digitaldosimeter zur Selbstablesung (Geiger-Müller-Prinzip)

6. Durch eine Tür, die den Kontrollbereich lüftungstechnisch vom übrigen Bereich des Kraftwerkes abtrennt, gelangt der Mitarbeiter in einen zweiten Umkleideraum. Dort werden Kittel und Badesandalen gegen eine komplette Arbeitsmontur ausgetauscht: Overall, Sicherheitsschuhe, Helm, evtl. Handschuhe und Atemschutzmaske. Die beiden Dosimeter werden in der Brusttasche des Overalls positioniert (Abb. 12.4.5).

Abb. 12.4.5
Mitarbeiter in Arbeitsmontur

7. Ist bei den durchzuführenden Arbeiten im Kontrollbereich mit einer Freisetzung radioaktiver Stoffe zu rechnen, befindet sich am Arbeitsplatz eine weitere Garderobe. Dort wird ein zweiter Overall über den ersten gestreift, Überschuhe und Stoffhandschuhe angezogen und bei Bedarf zusätzlich Atemschutzgerät ausgegeben.

Das Digitaldosimeter wird in einem solchen Fall vor Arbeitsbeginn erneut vom Rechner ausgelesen, so daß nach Beendigung der Tätigkeit eine arbeitsplatzbezogene Dosis bestimmt werden kann.

So kann zwischen der Dosis im Kontrollbereich insgesamt und der Arbeitsplatzdosis unterschieden werden.
(Bei Arbeiten an Objekten, von denen Betastrahlen oder Neutronenstrahlen hoher Intensität ausgehen, erhält der Mitarbeiter ein spezielles, zusätzliches Dosimeter.)

8. Am Arbeitsplatz dürfen nur die im Auftrag genannten Arbeiten ausgeführt werden (Abb. 12.4.6).
(Bei einer Tätigkeit an kontaminierten Bauteilen wäre ein weiterer Wechsel von Überschuhen und ein Anlegen von Gummihandschuhen erforderlich.)

9. Nach Beendigung der Arbeit gelangt der Mitarbeiter auf demselben Weg wieder nach draußen. Es findet der umgekehrte Kleidertausch wie bei 7. statt.

Der Rechner liest das Digitaldosimeter aus und ermittelt, welche Strahlendosis am Arbeitsplatz erhalten wurde.

Abb. 12.4.6
Arbeitsplatz an der Brennelementewechselmaschine

Abb. 12.4.7
Prüfung auf radioaktive Kontamination am Ganzkörpermonitor

10. Ein Ganzkörpermonitor überprüft, ob die Arbeitskleidung kontaminiert ist (Abb. 12.4.7). Anschließend wird die Arbeitskleidung wieder gegen Kittel und Badesandalen getauscht.

11. Im Kittel und in Badesandalen verläßt der Mitarbeiter den Kontrollbereich.
An einem Endmonitor wird überprüft, ob eine Kontamination des Körpers vorliegt. Bei einer Kontamination der Haut muß diese gründlich mit Wasser und flüssiger Seife gereinigt werden.
Der Wert des Digitaldosimeters wird automatisch vom Rechner gelesen (Abb. 12.4.8). Damit ist die im Kontrollbereich insgesamt erhaltene Dosis ermittelt.
Das Filmdosimeter trägt der beruflich strahlenexponierte Mitarbeiter einen Monat lang im Kontrollbereich. Anschließend wird es von einer amtlichen Stelle ausgewertet.
Die Dosimeter bleiben in der Dosimeterzentrale.

12. Im Umkleideraum außerhalb des Kontrollbereichs werden Kittel und Badesandalen wieder gegen die eigene Kleidung getauscht.

13. Der Mitarbeiter verläßt das Kraftwerksgebäude.

Abb. 12.4.8
Eingabe der Dosimeterwerte (Kontrollbereicheingang)

Literaturverzeichnis

[1] Aigner, R.; Melzer, E.; Seißler, H.: Die Strahlenschutz-Fibel. München: Wilhelm Heyne 1986

[2] Albrecht, E. et al.: Endlagerung radioaktiver Rückstände. Bonn: Deutsches Atomforum 1969 (2. Aufl.)

[3] Aurand, K. et al.: (Hrsg.): Die natürliche Strahlenexposition des Menschen. Stuttgart: Georg Thieme 1974

[4] Aurand, K.; Gans, I.; Rühle, H.: Radioökologie und Strahlenschutz. Berlin: Erich Schmidt 1982

[5] Bauer, E.W.: Humanbiologie. Berlin: Cornelsen-Velhagen & Klasing 1974

[6] Bäuerle, H.G.; Harreis, H.: Ionisierende Strahlen I. Stuttgart: Ernst Klett 1982

[7] Bäuerle, H.G.; Harreis, H.: Ionisierende Strahlen II. Stuttgart: Ernst Klett 1982

[8] Baumgärtel, G. et al.: Brennstoff aus der Asche. Die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen. Essen: W. Girardet 1984

[9] Borsch, P.; Münch, E.; Paschke, M.: Kerntechnik und Gesundheit. Düsseldorf: Cornelsen Verlag Schwann-Girardet 1988

[10] Bunzl, K. et al.: Radioaktivität und Strahlenfolgen. Messen-Abschätzen-Bewerten. München: Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung 1986

[11] Christen, H.R.: Struktur-Stoff-Reaktion, Sekundarstufe I. Frankfurt, Berlin, München: Diesterweg Salle / Aarau: Sauerländer 1974

[12] Deutsches Atomforum: Sicherheit und Unfallbeherrschung bei DWR- und SWR-Kernkraftwerken. Bonn: INFORUM Verlags- und Verwaltungsgesellschaft 1987

[13] Feinendegen, L.E.; Feldmann, A.; Münch, E.; Paschke, M.: Strahlenschutz, Radioaktivität und Gesundheit. München: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen 1985

[14] Finkelnburg, W.: Einführung in die Atomphysik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1967 (12. Aufl.)

[15] Freie und Hansestadt Hamburg: Wirkung schwacher radioaktiver Strahlung auf den Menschen. Hamburg: Gesundheitsbehörde 1988

[16] Freie und Hansestadt Hamburg: Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl auf die Umwelt in Hamburg (Stand: 26. Mai 1986)

[17] Friedrich, A. (Hrsg.): Handbuch der experimentellen Schulphysik, Bd. 10 Atomphysik, Atom und Atomhülle, Kernphysik. Köln: Aulis 1969

[18] Fritz-Niggli, H.: Strahlengefährdung / Strahlenschutz. Bern, Stuttgart, Wien: Hans Huber 1975

[19] Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH (Hrsg.): Neuere Erkenntnisse zum Unfall im Kernkraftwerk Tschernobyl. Köln 1987

[20] Glocker, R.; Macherauch, E.: Röntgen- und Kernphysik für Mediziner und Biophysiker, Stuttgart 1971 (2. Aufl.)

[21] Gruber, E.; Weish, P.: Radioaktivität und Umwelt. Stuttgart, New York: Gustav Fischer 1979 (2. Aufl.)

[22] Gumprecht, D.; Kind, A. (Redaktion): Auswirkungen des Reaktorunfalls in Tschernobyl in der Bundesrepublik Deutschland. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission zur Abschätzung, Begrenzung und Bewertung: Stuttgart, New York: Gustav Fischer 1986

[23] Harten, H.-U.; Nägerl, H.; Schulte, H.-D.: Atom- und Kernphysik. Freiburg, Basel, Wien: Herder 1983

[24] Hehn, G.: Das Strahlungsfeld des Reaktors. München: Karl Thiemig 1964

[25] Henk, H.-H.: Die zivilisatorisch bedingte Strahlenbelastung. Hamburg: Hamburgische Electricitäts-Werke AG 1986 (5. Aufl.)

[26] Herrmann, G.: Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt. In: Chemie in unserer Zeit 5 / 1988, S. 172–182

[27] Hilscher, H.; Krahn, H.: Atom- und Kernphysik. 3: Grundlagen der Physik des Atomkerns. Tübingen: Deutsches Institut für Fernstudien 1988

[28] Höchel, J. et al.: Der Brennstoffkreislauf. Bonn: Deutsches Atomforum 1972

[29] Höfling, O.: Strahlengefahr und Strahlenschutz. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag 1961

[30] Hosemann, G.; Wirth, E.: Natürliche und künstliche Strahlung in der Umwelt. Eine Bilanz vor und nach Tschernobyl. Erlangen: Universitätsbund Erlangen-Nürnberg 1987

[31] Jakobi, W.: Strahlenschutzpraxis. Teil I: Grundlagen. München: Karl Thiemig 1962

[32] Kaul, A.: Strahlendosis und Strahlenrisiko: Begrenzung auf das Annehmbare. In: Deutsches Ärzteblatt 48 / 1989, B-2541 bis B-2547

[33] Keller, C.: Chemie / Radiochemie: Frankfurt, Berlin, München: Diesterweg / Salle. Aarau: Sauerländer 1975

[34] Keller, C.; Möllinger, H. (Hrsg.): Kernbrennstoffkreislauf Band I. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig 1978

[35] Keller, C.; Möllinger, H. (Hrsg.): Kernbrennstoffkreislauf Band II. Heidelberg: Dr. Alfred Hüthig 1978

[36] Kiefer, J.: Biologische Strahlenwirkung. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag 1989

[37] Kiefer, H.; Koelzer, W.: Strahlen und Strahlenschutz. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer 1986

[38] Kliefoth, W.: Atomkernreaktoren. Bonn: Deutsches Atomforum 1964 (4. Aufl.)

[39] Koelzer, W.: Lexikon zur Kernenergie. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH 1988

[40] Kranefeld, A.; Linnig, J.: Radon und Strahlung aus Baustoffen. Köln: Strahlenmeßstelle GAMMA beim Katalyse-Institut für angewandte Umweltforschung e.V. 1990

[41] Kraut, A.: Kernstrahlungsmeßtechnik. Bonn: Deutsches Atomforum 1969

[42] Lange, F.; Rüggeberg, H.; Svoboda, F.: Biologie für Mittelschulen Bd. 3. Berlin, Hannover, Darmstadt: Hermann Schrödel Verlag 1961

[43] Lindner, H.: Grundriß der Atom- und Kernphysik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1975 (11. Aufl.)

[44] Martin, I.: Radioaktivität und Strahlung im Alltag. Erweiterter Sonderdruck aus der Siemens-Zeitschrift 5 / 1981

[45] Münch, E. (Hrsg.): Tatsachen über Kernenergie. Essen: Girardet 1980 (2. Aufl.)

[46] Nachtigall, D.: Physikalische Grundlagen für Dosimetrie und Strahlenschutz. München: Karl Thiemig 1971

[47] Nachtigall, D.: Wechselwirkung von Korpuskularstrahlung mit Materie. Kempen: Dr. te Neues (o. J.)

[48] Oberhofer, M.: Strahlenschutzpraxis, Meßtechnik. München: Karl Thiemig 1972 (2. Aufl.)

[49] Oberhofer, M.: Strahlenschutzpraxis. Teil III: Umgang mit Strahlern. München: Karl Thiemig 1968

[50] Pickert, F.-K.; Zech, H.-J.: Brennstoffkreislauf. Bonn: Deutsches Atomforum 1981

[51] Rassow, J.: Risiken der Kernenergie. Fakten und Zusammenhänge im Lichte des Tschernobyl-Unfalls. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1988

[52] Rausch, L.: Mensch und Strahlenwirkung. München, Zürich: R. Piper & Co. 1982

[53] Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk: Die Abgabe-Minimierung. Essen 1981 (3. Aufl.)

[54] Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk: Das Minimal-Prinzip. Essen (o. J.)

[55] Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk: Das Millirem-Konzept. Essen 1982 (4. Aufl.)

[56] Rose, E.: Die drei Grundregeln des Strahlenschutzes. Kempen: Dr. te Neues & Co. (o. J.)

[57] Rysy, W.: Druckwasserreaktor-Kraftwerke, Sicherheitstechnische Auslegung. Erlangen: Siemens AG 1987

[58] 3. Saarbrücker Akademie-Kolloquium in Zusammenarbeit mit der Universität des Saarlandes. München: Mensch und Weltraum 1988

[59] Sauermann, P.-F.: Strahlenschutz durch Abschirmung. München: Karl Thiemig 1976

[60] Sauter, E.: Grundlagen des Strahlenschutzes. München: Karl Thiemig 1983 (2. Aufl.)

[61] Schmidt, M. (Hrsg.): Das Strahlenrisiko von Tschernobyl. Heidelberg: Das Wunderhorn 1987

[62] Schulte-Frohlinde, D.: Die Chemie des zellulären Strahlentodes. In: Chemie in unserer Zeit, 1 / 1990, S. 37–44

[63] Schultz, H.; Vogt, H.-G.: Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes. München: Karl Thiemig 1977

[64] Seelmann-Eggebert, W.; Pfennig, G.; Münzel, H.; Klewe-Nebenius, H.: Nuklidkarte. München: Gersbach & Sohn Verlag 1981 (5. Aufl.)

[65] Strahlenschutzverordnung 1989. Zusammengestellt und mit einer erläuternden Einführung versehen von Hans-Michael Veith. Köln: Bundesanzeiger Verlags-Gesellschaft mbH. 1989

[66] Steffer, C.: Ionisierende Strahlung: Biologisch-medizinische Wirkungen und Abschätzung des Risikos. Frankfurt: Kassenarzt-Verlag GmbH 1989

[67] Vieser, H.: Wohin mit dem Atom-Müll....ins Salz, ins Erz? In: bild der wissenschaft 4 / 1988, S. 95–11

[68] Vogg, H.: Radioaktivität – heute. Bonn: Deutsches Atomforum 1970

[69] Volkmer, M.: Die natürliche Strahlenbelastung. Hamburg: Hamburgische Elektricitätswerke AG 1989 (8. Aufl.)

[70] Volkmer, M.: Basiswissen zum Thema Kernenergie. Hamburg: Hamburgische Elektricitätswerke AG 1989 (11. Aufl.)

[71] Wachsmann, F.: Strahlenschutz geht alle an. München: Karl Thiemig 1969

[72] Wirth, W.: Prof. Dr. W. Wirth´s kleine Nährwerttabelle der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e.V. Frankfurt: Umschau Verlag 1978 (28. Aufl.)

[73] Zech, H.-J.: Kernreaktoren. Bonn: INFORUM Verlags- und Verwaltungs GmbH 1988

[74] Ziegelmann, H.; Krahn, H.: Atom- und Kernphysik. 4: Kernenergie. Tübingen: Deutsches Institut für Fernstudien 1986

Außerhalb der alphabetischen Reihenfolge:

[75] Graewe, H.: Atomphysik. Grundlagen – Atomhülle – Atomkern. Köln: Aulis-Verlag Deubner & Co. 1979 (3. Aufl.)

[76] Der Bundesminister des Innern (Hrsg.): Die Strahlenexposition von außen in der Bundesrepublik Deutschland durch natürliche radioaktive Stoffe im Freien und in Wohnungen unter Berücksichtigung des Einflusses von Baustoffen. Bonn 1981

[77] Aurand, K. (Hrsg.): Kernenergie und Umwelt. Berlin: Erich Schmidt Verlag 1976

[78] Kiefer, H.; Maushart, R.: Strahlenschutzmeßtechnik. Karlsruhe: G. Braun 1964

[79] Schuricht, V. et al.: Strahlenschutzphysik. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft 1975

[80] Flindt, R.: Biologie in Zahlen. Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag 1985

[81] Deutscher Bundestag, 11. Wahlperiode: Bericht der Bundesregierung über Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung für das Jahr 1988. Drucksache 11/6144 vom 20. 12. 89.

Sachwortverzeichnis

Tabelle 1: Dezimale Vielfache und Teile von Einheiten

Vorsätze	Kurzzeichen	Zehnerpotenz	Vorsätze	Kurzzeichen	Zehnerpotenz
Tera	T	10^{12}	Zenti	c	10^{-2}
Giga	G	10^{9}	Milli	m	10^{-3}
Mega	M	10^{6}	Mikro	µ	10^{-6}
Kilo	k	10^{3}	Nano	n	10^{-9}
Hekto	h	10^{2}	Pico	p	10^{-12}
Deka	da	10^{1}	Femto	f	10^{-15}
Dezi	d	10^{-1}	Atto	a	10^{-18}

Beispiele:

1 MeV = 10^{6} eV; 1 mSv = 10^{-3} Sv; 1 THz = 10^{12} Hz;
4 nm = $4 \cdot 10^{-9}$ m; 1 pg = 10^{-12} g; 1 kBq = 10^{3} Bq

Tabelle 2: Griechisches Alphabet

A α **alpha**	Z ζ **zeta**	Λ λ **lambda**	Π π **pi**	Φ ϕ **phi**
B β **beta**	H η **eta**	M μ **mü**	P ρ **rho**	X χ **chi**
Γ γ **gamma**	Θ θ **theta**	N ν **nü**	Σ σ **sigma**	Ψ ψ **psi**
Δ δ **delta**	I ι **iota**	Ξ ξ **xi**	T τ **tau**	Ω ω **omega**
E ε **epsilon**	K κ **kappa**	O o **omikron**	Y υ **ypsilon**	

Tabelle 3: Einheiten der Aktivität und Strahlendosis

Physikalische Größe	SI-Einheit	alte Einheit	Beziehung
Aktivität	Becquerel (Bq) 1 Bq = 1/s	Curie (Ci)	1 Ci = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq 1 Bq ≈ $2{,}7 \cdot 10^{-11}$ Ci
Energiedosis	Gray (Gy) 1 Gy = 1 J/kg	Rad (rd)	1 rd = 0,01 Gy 1 Gy = 100 rd
Äquivalentdosis	Sievert (Sv) 1 Sv = 1 J/kg	Rem (rem)	1 rem = 0,01 Sv 1 Sv = 100 rem
Ionendosis	Coulomb durch Kilogramm (C/kg)	Röntgen (R)	1 R = $2{,}85 \cdot 10^{-4}$ C/kg 1 C/kg ≈ $3{,}876 \cdot 10^{3}$ R

Herausgegeben vom Informationskreis Kernenergie.